

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia Aeroespacial

Definição da malha aérea e aeronaves para uma nova companhia aérea regional com *hub* em Goiânia

Autor: Thiago Dias de Jesus
Orientador: Dr. Sergio Henrique da Silva Carneiro
Coorientador: Dr. Victor Rafael Rezende Celestino

Brasília, DF
2019



Thiago Dias de Jesus

Definição da malha aérea e aeronaves para uma nova companhia aérea regional com *hub* em Goiânia

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Dr. Sergio Henrique da Silva Carneiro

Coorientador: Dr. Victor Rafael Rezende Celestino

Brasília, DF

2019

Thiago Dias de Jesus

Definição da malha aérea e aeronaves para uma nova companhia aérea regional com *hub* em Goiânia/ Thiago Dias de Jesus. – Brasília, DF, 2019-

76 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Sergio Henrique da Silva Carneiro

Coorientador: Dr. Victor Rafael Rezende Celestino

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA , 2019.

1. companhia aérea. 2. aviação regional. I. Dr. Sergio Henrique da Silva Carneiro. II. Dr. Victor Rafael Rezende Celestino. III. Universidade de Brasília. IV. Faculdade UnB Gama. V. Definição da malha aérea e aeronaves para uma nova companhia aérea regional com *hub* em Goiânia

CDU 02:141:005.6

Thiago Dias de Jesus

Definição da malha aérea e aeronaves para uma nova companhia aérea regional com *hub* em Goiânia

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 02 de julho de 2019 – Data da aprovação do trabalho

Dr. Sergio Henrique da Silva Carneiro
Orientador

Dr. Victor Rafael Rezende Celestino
Coorientador

**Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos
Júnior**
Convidado

Dr. Mateus Rodrigues Miranda
Convidado

Brasília, DF
2019

*Este trabalho é dedicado a todas as pessoas
que lutam para ter um Brasil melhor.*

Agradecimentos

Um agradecimento especial para os professores Victor Celestino e Sergio Carneiro, pela sua incrível vontade de ensinar e paciência com seus orientandos. A UnB é uma das melhores universidades do Brasil por causa de professores assim, que se importam em saber se o seu conhecimento está sendo transmitido da melhor maneira possível. Agradeço a todos os órgãos e em empresas que colaboraram para que a conclusão deste trabalho fosse possível (Embraer e ANAC), assim como os seus representantes. E por fim, mas não menos importante, gratifico a todos os meus amigos, que sempre me ajudam quando mais preciso e sei que poderei confiar sempre.

“Quando somos crianças, raramente pensamos no futuro. Esta inocência deixa-nos livres para nos divertirmos como poucos adultos conseguirão. O dia em que nos preocupamos com o futuro é também o dia em que deixamos a infância para trás.”
(Patrick Rothfuss, *O Nome do Vento*)

Resumo

O mercado da aviação civil é extremamente competitivo, e uma boa estruturação da companhia aérea que irá atuar no setor é fundamental, não podendo estar sujeita a gastos desnecessários. Com isso, a escolha de um *hub* de atuação, assim como quais destinos serão realizados e as respectivas aeronaves para cumprir estas rotas, é essencial para a empresa. Desta forma, esta pesquisa objetiva modelar um processo para a escolha da malha aérea e aeronaves de uma nova companhia aérea regional com o *hub* em Goiânia de forma a maximizar a lucratividade da mesma. Através de dados e informações coletados após reuniões e entrevistas com representantes da Embraer e ANAC, pôde-se selecionar um mix de aeronaves e destinos para representarem a empresa no mercado regional. Estes dados são de caráter quantitativos e foram obtidos por meio de uma metodologia baseada no *Design Science Research*. Além disso, os resultados são encontrados com a utilização da modelagem matemática e computacional de pesquisa operacional com auxílio do *software* LINGO. Os melhores destinos e aeronaves ótimas são encontrados para diversos cenários analisados e seus lucros calculados. Com isso, impõe-se a constatação de que o mercado da aviação regional possui um grande espaço para crescimento no Brasil, e consequentemente a obtenção de lucros ao realizar-se um bom planejamento inicial.

Palavras-chave: companhia aérea. aviação regional. malha aérea.

Abstract

The civil aviation market is extremely competitive, and a good structuring of the airline that will operate in the sector is fundamental, and can not be subject to unnecessary expenses. With this, the choice of an operating hub, as well as which destinations will be realized and the respective aircraft to fulfill these routes, is essential for the company. In this way, this research aims to model a process for the choice of the air network and aircraft of a new regional airline with the hub in Goiânia in order to maximize its profitability. Through data and information collected after meetings and interviews with representatives of Embraer and ANAC, it was possible to select a mix of aircraft and destinations to represent the company in the regional market. These data are quantitative in nature and were obtained by means of a methodology based on Design Science Research. In addition, the results are found using operations research mathematical and computational modeling with the help of the LINGO software. The best destinations and optimum aircraft are found for various scenarios analyzed and their calculated profits. As a result, it is necessary to verify that the regional aviation market has a large space for growth in Brazil, and consequently profits are obtained when a good initial planning is carried out.

Key-words: airlines. regional aviation. air network.

Resumen

El mercado de la aviación civil es extremadamente competitivo, y una buena estructuración de la compañía aérea que operará en el sector es fundamental, no pudiendo estar sujeta a gastos innecesarios. Con ello, la elección de un *hub* de actuación, así como qué destinos se realizarán y las respectivas aeronaves para cumplir estas rutas, es esencial para la empresa. De esta forma, esta investigación objetiva modelar un proceso para la elección de la red aérea y aeronaves de una nueva compañía aérea regional con el *hub* en Goiânia para maximizar la rentabilidad de la misma. A través de datos e informaciones recolectados tras reuniones y entrevistas con representantes de Embraer y ANAC, se pudo seleccionar un mix de aeronaves y destinos para representar a la empresa en el mercado regional. Estos datos son de carácter cuantitativo y fueron obtenidos con una metodología basada en la *Design Science Research*. Además, los resultados se encuentran con el uso del modelado matemático y computacional de la investigación operacional con la ayuda del *software* LINGO. Los mejores destinos y aeronaves óptimas se encuentran para diversos escenarios analizados y sus ganancias calculadas. Con ello, se impone la constatación de que el mercado de la aviación regional posee un gran espacio para el crecimiento en Brasil, y consecuentemente la obtención de beneficios al realizarse una buena planificación inicial.

Palabras-clave: compañía aérea. aviación regional. malla aérea.

Résumé

Le marché de l'aviation civile est extrêmement concurrentiel, et une bonne structuration de la compagnie aérienne qui opérera dans le secteur est fondamentale et ne peut être soumise à des dépenses inutiles. Ainsi, le choix d'une *hub* d'action, ainsi que les destinations seront effectuées et leurs avions pour répondre à ces routes, il est essentiel pour l'entreprise. Ainsi, cette recherche vise à modéliser un processus pour le réseau routier et le choix des avions d'une nouvelle compagnie aérienne régionale avec *hub* à Goiânia afin de maximiser la rentabilité de même. À partir des données et des informations recueillies après des réunions et des entretiens avec des représentants d'Embraer et ANAC, il était possible de choisir un mélange d'avions et des destinations pour représenter l'entreprise sur le marché régional. Ces données sont de nature quantitative et sont obtenues pour une méthodologie basée sur *Design Science Research*. De plus, les résultats de l'utilisation de la modélisation mathématique et de calcul de la recherche opérationnelle à l'aide du logiciel LINGO. Les meilleures destinations et grands avions sont trouvés pour différents scénarios analysés et calculés leurs bénéfices. En conséquence, il est nécessaire de vérifier que le marché de l'aviation régionale dispose d'un large espace de croissance au Brésil et, par conséquent, des bénéfices sont obtenus lorsqu'une bonne planification initiale est réalisée.

Mots-clé : compagnies aériennes. aviation régionale. réseau aérien.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Malha de uma companhia aérea com seus hubs e spokes.	35
Figura 2 – Interior do Embraer ERJ 145, que possui fuselagem estreita.	36
Figura 3 – Validação do modelo simplificado no LINGO.	50
Figura 4 – Validação do modelo simplificado no Solver.	50
Figura 5 – Malha final com a origem e todos os destinos.	51
Figura 6 – <i>Yield</i> médio pela distância para a classe com até 120 assentos.	54
Figura 7 – <i>Yield</i> médio pela distância para a classe entre 121 e 150 assentos.	54
Figura 8 – <i>Yield</i> médio pela distância para a classe com mais de 150 assentos.	54
Figura 9 – <i>Yield</i> médio pela distância.	55
Figura 10 – Número de alocações por assentos para o cenário com lucro máximo.	62

Lista de tabelas

Tabela 1 – Lista de aeronaves regionais produzidas ao longo da história.	36
Tabela 2 – Destinos encontrados após análise dos dados de demanda.	42
Tabela 3 – População de aeronaves e seus respectivos número de assentos.	43
Tabela 4 – Destinos e aeronaves do modelo simplificado.	49
Tabela 5 – Destinos finais selecionados após exclusões de demanda mínima.	52
Tabela 6 – Demanda semanal para cada rota selecionada.	52
Tabela 7 – Classificação das aeronaves por número de assentos.	53
Tabela 8 – Resultado da alocação de aeronaves para o primeiro cenário.	56
Tabela 9 – Resultado da alocação de aeronaves para o segundo cenário.	57
Tabela 10 – Resultado da alocação de aeronaves para o terceiro cenário.	58
Tabela 11 – Resultado da alocação de aeronaves para o quarto cenário.	59
Tabela 12 – Resultado da alocação de aeronaves para o quinto cenário.	60
Tabela 13 – Resultado da alocação de aeronaves para o sexto cenário.	61
Tabela 14 – Lucro dos cenários dois, cinco e seis.	62
Tabela 15 – Variação entre os cenários dois e cinco.	62
Tabela 16 – Variação entre os cenários dois e seis.	63
Tabela 17 – Variação entre os cenários cinco e seis.	63
Tabela 18 – Resultado final para o melhor dos cenários.	64

Lista de abreviaturas e siglas

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ASK	Acento quilômetro disponível (do inglês <i>Available Seat-Kilometer</i>)
CASK	Custo por assento-quilômetro (do inglês <i>Cost per Available Seat-Kilometer</i>)
DAC	Departamento de Aviação Civil
FAP	Problema de alocação de frota (do inglês <i>Fleet Assignment Problem</i>)
HUB	Centro de Conexão
ICAO	Organização da Aviação Civil Internacional (do inglês <i>International Civil Aviation Organization</i>)
RASK	Receita por assento-quilômetro (do inglês <i>Revenue per Available Seat-Kilometer</i>)
RPK	Passageiro quilômetro pagante (do inglês <i>Revenue Passenger Kilometer</i>)
TOC	Custos Operacionais Totais (do inglês <i>Total Operating Costs</i>)
TOR	Receita Operacional Total (do inglês <i>Total Operating Revenue</i>)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Contextualização	27
1.2	Justificativa	27
1.3	Problemática	28
1.4	Hipótese	28
1.5	Objetivos	28
1.5.1	Objetivo geral	28
1.5.2	Objetivos específicos	28
1.6	Organização do trabalho	29
2	REFERENCIAL TÉORICO	31
2.1	Mercado regional	31
2.2	Conceitos da aviação	32
2.2.1	ANAC	32
2.2.2	Custos operacionais totais	32
2.2.3	Receitas operacionais totais	32
2.2.4	ASK	32
2.2.5	RPK	33
2.2.6	CASK	33
2.2.7	RASK	33
2.2.8	Yield	33
2.2.9	Demanda	33
2.2.10	Hub and spoke	34
2.3	Malha aérea	34
2.4	Aeronaves	35
2.5	Pesquisa operacional	37
2.5.1	Programação linear	37
2.5.2	Programação inteira	38
2.5.3	Aplicação da programação inteira na aviação civil	38
2.6	Plano de negócios	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	Tipo de estudo e delineamento da pesquisa	41
3.2	População e amostra	41
3.2.1	Atuação da companhia	41
3.2.2	Malha aérea	42

3.2.3	Aeronaves	42
3.3	Coleta de dados	43
3.4	Análise de dados	43
3.4.1	Criação da companhia aérea e plano de negócios	43
3.4.2	Escolha do HUB	43
3.4.3	Definição da malha	44
3.4.4	Seleção de aeronaves	44
3.4.5	Preço da passagem	45
3.5	Modelo matemático	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	Validação do modelo	49
4.2	Rotas selecionadas e malha final	51
4.3	Demanda	52
4.4	Preços das passagens	53
4.5	Modelagem	56
4.5.1	Primeiro cenário	56
4.5.2	Segundo cenário	57
4.5.3	Terceiro cenário	58
4.5.4	Quarto cenário	59
4.5.5	Quinto cenário	60
4.5.6	Sexto cenário	60
4.6	Análise dos resultados	61
	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICES	71
	APÊNDICE A – CÓDIGOS ICAO	73
	APÊNDICE B – CÓDIGO LINGO	75

1 Introdução

1.1 Contextualização

Atualmente as viagens aéreas são muito utilizadas por aquelas pessoas que desejam um transporte rápido e seguro. Quando se pretende viajar para um destino mais distante, o transporte aéreo tem um forte peso na decisão de escolha se comparado aos outros meios.

A história das primeiras companhias aéreas começou há mais de um século, com a criação da primeira companhia aérea nos Estados Unidos (COOK; BILLIG, 2017). Desde a criação das primeiras empresas aéreas muito se mudou, e no Brasil não foi diferente. O que se vê hoje é um mercado dominado por três grandes companhias e bastante competitivo.

Entretanto, as principais empresas aéreas do país não têm como modalidade principal de transporte as rotas aéreas regionais, que possuem uma menor demanda por passageiros, focando a sua atuação em rotas domésticas com grande demanda, geralmente grandes capitais e metrópoles ou rotas internacionais.

Apesar do mercado regional ser pouco explorado, há algumas companhias regionais atuando no país atualmente. Contudo, as mesmas tiveram apenas 0,5% da participação no mercado doméstico no ano de 2017, segundo dados do Painel de Indicadores do Transporte Aéreo do ano, divulgado pela ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), (ANAC, 2018a). Isto mostra o quanto esse setor do transporte aéreo é pouco explorado no Brasil.

Quando uma companhia aérea deseja criar novas rotas, ela desenvolve um estudo para identificar qual aeronave se encaixa melhor na malha pretendida. Para construir uma empresa de transporte aéreo regional eficiente é necessário operar aviões que combinem com as características das rotas regionais: voos mais curtos e baixa demanda de passageiros (BETTINI, 2010). Para isso, foram projetados os aviões para operarem segundo os requisitos de rotas regionais. Atualmente os dois principais fabricantes desta classe de aviões no mundo são a Boeing Brasil-Commercial e a Airbus.

1.2 Justificativa

A escolha de um *hub*, nó central de uma malha aérea, em um local estratégico é fundamental para a boa operação da companhia, pois este será o local onde ocorrerá a redistribuição de passageiros pelo país, funcionando como distribuidor da rede. O mesmo vale para a escolha das aeronaves, uma vez que cada uma tem características distintas, tornando-as mais ou menos recomendáveis em relação a outras. Quando uma companhia aérea não faz um bom estudo de viabilidade na hora da compra de um avião comercial ou na escolha do seu *hub*, o resultado

pode ser catastrófico. O mal planejamento já levou à falência empresas grandes e renomadas do setor.

1.3 Problemática

Visando a abertura de uma companhia aérea regional, buscou-se analisar como a escolha das aeronaves comerciais podem impactar na rentabilidade da companhia, assim como a escolha da malha aérea. Desta forma, buscou-se responder a seguinte pergunta: para a criação de uma nova companhia aérea regional com *hub* em Goiânia, como escolher a melhor malha e as melhores aeronaves?

1.4 Hipótese

Tem-se como hipótese de pesquisa que uma boa estratégia para encontrar as melhores malha e aeronaves para esta companhia aérea regional será a utilização da Pesquisa Operacional, visto que ela é amplamente utilizada na indústria em geral e é considerada uma ótima área para a realização de otimizações.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é modelar o processo de escolha de aeronaves e de uma malha aérea regional, operadas a partir do *hub* em Goiânia, de forma a maximizar a lucratividade de uma nova empresa aérea.

1.5.2 Objetivos específicos

- Compreender conceitos relacionados ao planejamento da frota de empresas aéreas e das possíveis aplicações da pesquisa operacional para solucionar o problema;
- Compreender o processo de definição de uma malha para uma companhia aérea e sua importância no planejamento;
- Definir os tipos de aeronaves mais adequadas para atuar no mercado regional;
- Apresentar as fases de um plano de negócios para uma companhia aérea e sua importância para se obter um negócio lucrativo;
- Definir uma malha de operação, identificando quais são os melhores destinos para esta empresa;

- Determinar os preços das passagens aéreas para cada destino analisado, a partir de dados secundários;
- Determinar as combinações de frotas de aeronaves ótimas para a malha definida.

1.6 Organização do trabalho

Esta pesquisa foi estruturada em cinco capítulos. Como visto no capítulo 1 (Introdução), apresenta-se a introdução deste trabalho, onde é mostrado um panorama geral da história das companhias aéreas pelo mundo e como estão atualmente.

O capítulo 2 (Referencial teórico) expõe as teorias e referências que são fundamentais para o entendimento e conclusão desta pesquisa, assim como conceitos amplamente utilizados na aviação civil e equações que representam seus cálculos financeiros e de demanda. Além disso, é apresentado o mercado regional da aviação e quais suas principais características. Também, introduz-se uma área de conhecimento para obtenção de soluções para problemas operacionais, a Pesquisa Operacional, e algumas de suas variações. Por fim, mostra-se um guia de como planejar o plano de negócios para uma companhia aérea.

O capítulo 3 (Metodologia) aborda as principais metodologias de pesquisa utilizadas neste trabalho, assim como suas aplicações. Com isso, apresenta-se a coleta e análise dos dados, assim como quais restrições e métodos são implementados no modelo. É exposto o modelo matemático que define este trabalho, mostrando quais suas restrições e o porquê das mesmas.

O capítulo 4 (Resultados e discussões) inicia-se apresentando a validação do modelo e comparando os resultados tanto analíticos quanto pelo *software* LINGO. Além disso, analisa e entrega os resultados encontrados, comparando-os entre si e encontrando as soluções ótimas do modelo. Primeiro apresenta-se quais são as rotas finais utilizadas no trabalho e como é definida a malha aérea. Obtém-se o preço das passagens aéreas para cada destino e de acordo com a aeronave escolhida. Por último, são analisados todos os cenários escolhidos, onde cada cenário representa uma forma de alocação, e realiza-se uma comparação para definir o melhor deles.

E por fim, o capítulo final (Conclusão) apresenta as conclusões finais deste projeto após a realização das etapas anteriores, mostrando os principais resultados encontrados e discussões dos mesmos. Além disso, apresenta recomendações para pesquisas futuras na área.

2 Referencial teórico

2.1 Mercado regional

O foco deste trabalho é apresentar a criação de uma companhia aérea regional. Para isso, é necessário definir e entender o que *regional* significa exatamente. De acordo com Bettini H. (BETTINI, 2010, 4):

Usualmente, atribui-se a nomenclatura de aviação regional à atividade explorada de maneira regular que, simplificada, utiliza aeronaves de capacidade inferior a cem passageiros e as utiliza em ligações com cidades que possuam densidade de tráfego (ou seja, número de passageiros por unidade relevante de tempo reduzida). Contudo, deve-se ressaltar que o conceito de aviação regional é difuso quanto a suas fronteiras: são frequentes os casos de empresas aéreas regionais operando aeronaves de capacidade superior a cem lugares e/ou voando entre cidades de elevada densidade de tráfego; também frequentes são os casos de empresas aéreas de porte nacional com operações em cidades que tradicionalmente seriam incluídas na categoria de baixa densidade de tráfego.

Assim, esta definição ainda sofre de questionamentos pela comunidade da área, e o mesmo acontece no Brasil, onde as três principais companhias aéreas também transportam passageiros para locais que seriam considerados de baixa densidade, e consequentemente regionais.

O mercado regional no Brasil ainda não é muito grande. Segundo (ANAC, 2018a), em 2017 a participação dos voos regionais no mercado doméstico foi de apenas 0,5%. Este valor é muito pequeno se comparado com outros países, principalmente na Europa. Uma das explicações pode estar na dimensão do país. O Brasil é um país continental e por isso grandes companhias aéreas preferem criar rotas para grandes centros urbanos e com grande demanda para diminuir os gastos operacionais.

Segundo Bettini H., para distâncias mais longas entre cidades com baixa demanda, este meio de transporte se torna mais viável para algumas pessoas, por ser mais rápido e seguro, principalmente se comparado ao carro ou ônibus (BETTINI, 2010).

Nota-se no Brasil que o tráfego aéreo é extremamente centrado nas regiões mais ao centro-sul do país, tendo São Paulo como um centro. Esse distanciamento das regiões mais ao norte mostra-se um fator de preocupação, pois são regiões com maior necessidade de um transporte eficiente que possa ajudar o seu desenvolvimento local. Além disso, estas regiões podem ter um grande peso na participação de uma nova companhia aérea regional.

2.2 Conceitos da aviação

Existem diversos conceitos na aviação civil que são desconhecidos por leigos, e por isso alguns deles serão apresentados aqui para que o leitor tenha uma melhor compreensão dos objetivos deste trabalho e de suas conclusões.

2.2.1 ANAC

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) é a agência reguladora federal que fiscaliza o setor de aviação civil no país. Foi criada em 2005 em substituição ao Departamento de Aviação Civil (DAC), anteriormente comandado pelo Ministério da Aeronáutica (ANAC, 2018b).

Além de ter como missão a regulação e fiscalização da aviação civil no país, a ANAC tem como objetivo aumentar a eficiência do setor no Brasil, incluindo a infraestrutura aeroportuária e aeronáutica. Também compete à ANAC atuar na defesa do consumidor e na regulamentação de companhias aéreas que desejam entrar neste mercado (ANAC, 2018b).

2.2.2 Custos operacionais totais

O custo operacional total (TOC - do inglês *Total Operating Costs*) é um dos principais termos utilizados na aviação civil (TSAI; KUO, 2004b; SWAN; ADLER, 2006). Este indica todos os custos relacionados ao funcionamento da empresa e pode ser dividido em custos operacionais diretos e indiretos.

2.2.3 Receitas operacionais totais

As receitas operacionais totais (TOR - do inglês *Total Operational Revenue*) são todas as receitas que uma companhia aérea pode adquirir ao transportar passageiros, incluindo não somente o ganho com as passagens aéreas vendidas, mas também com a venda de alimentos, demais serviços durante o voo, entre outros.

2.2.4 ASK

Na aviação civil existem algumas siglas que definem termos operacionais, e uma delas é o ASK (*Available Seat Kilometer*) (TSAI; KUO, 2004a), sendo em português conhecido por assento-quilômetro disponível. O ASK expressa o total da oferta de assentos multiplicada pela distância em quilômetros dos trechos voados. Esta unidade é utilizada para calcular outras variáveis importantes.

2.2.5 RPK

O *Revenue Passenger Kilometers* (RPK), em português podendo ser traduzido como o número de passageiros pagantes-quilômetro (TSAI; KUO, 2004a), é uma medida de demanda. Fornece, como o próprio nome indica, o número de passageiros pagantes multiplicado pelos quilômetros viajados.

2.2.6 CASK

O CASK (*Cost per Available Seat Kilometer*), ou em português mais conhecido como custo por assento-quilômetro, pode ser definido como o custo operacional total da companhia aérea dividido pelo ASK, equação 2.1. Descrevendo de uma maneira mais simples, o CASK é o quanto a companhia aérea gasta em média por cada assento ofertado em um quilômetro voado.

$$\text{CASK} = \frac{\text{TOC}}{\text{ASK}} \quad (2.1)$$

O ideal é um CASK o menor possível, pois isto possibilita um custo menor por assento para cumprir a mesma distância, e assim pode-se lucrar mais com o voo. Este é um parâmetro utilizado na definição dos preços das passagens aéreas.

2.2.7 RASK

O RASK (*Revenue per Available Seat Kilometer*), conhecido em português como receita por assento-quilômetro, é a receita operacional total de um voo dividido pela quantidade de assentos ofertados e o total de quilômetros voados, e pode ser definido pela equação 2.2.

$$\text{RASK} = \frac{\text{TOR}}{\text{ASK}} \quad (2.2)$$

2.2.8 Yield

O *yield* expressa o valor ganho pela companhia aérea por cada assento-quilômetro pago, ou seja, quanto ela efetivamente está ganhando de cada passageiro pagante por um quilômetro voado. É um dos parâmetros mais utilizados pelas empresas para medirem o quão lucrativa é uma determinada rota. Assim, o *yield* pode ser expresso como

$$\text{yield} = \frac{\text{TOR}}{\text{RPK}}. \quad (2.3)$$

2.2.9 Demanda

A demanda é uma variável muito importante para uma companhia aérea, pois indica qual a receita potencial de uma rota. Pode acontecer de uma cidade possuir demanda para todos

os dias da semana, ou somente em alguns dias da semana. Por exemplo, em cidades turísticas, a demanda pode existir apenas no período de férias.

Para uma empresa aérea, é importante determinar se um aeroporto específico possui demanda e, mais precisamente, em quantos dias da semana, pois assim é possível definir qual aeronave pode cumprir tal rota com maior aproveitamento e eficiência.

2.2.10 Hub and spoke

Um *hub* de uma companhia aérea, também chamado de centro de conexão em português, é o local (aeroporto) que essa companhia utiliza para servir como ponto principal de suas operações. Assim, muitos voos partem de ou terão como destino este *hub* (BAZARGAN, 2010). Algumas companhias aéreas maiores possuem vários *hubs* para que suas demandas sejam supridas, enquanto que algumas companhias aéreas menores possuem apenas um *hub* (BAZARGAN, 2010).

Toda companhia aérea possui um centro de conexão. Geralmente é também nesse centro que todas as aeronaves desta companhia ficam quando não estão sendo utilizadas ou estão em manutenção. Além disso, um *spoke* é o local que é servido por esses *hubs* e que são atendidos por ele.

A utilização de configuração de rotas no formato *hub and spoke* traz diversas vantagens para uma empresa aérea (BRUECKNER; ZHANG, 2001). Um dos principais benefícios de se trabalhar com este formato é que a frequência de voos em um mesmo aeroporto aumenta se comparado ao formato em que todas as cidades estão conectadas, por exemplo, e isso pode resultar um lucro maior para a companhia.

2.3 Malha aérea

Assim como mencionado na seção 2.2.10, toda companhia aérea possui pelo menos um *hub* e um *spoke*. Além disso, quando uma empresa aérea é criada, uma das primeiras ações a se fazer é a definição da sua malha. Assim, ao definir seus *hubs* e seus *spokes*, esta companhia cria a sua malha aérea, a qual é formada pelas conexões de cidades abastecidas por estes voos (BAZARGAN, 2010). Na figura 1, tem-se um exemplo de malha de uma companhia aérea fictícia, na qual Washington Dulles e Chicago O'Hare são os *hubs* e as outras cidades conectadas são os *spokes*.

O mercado de transporte aéreo de passageiros é extremamente competitivo no Brasil e no mundo. Com isso, as companhias aéreas precisam analisar com rigor quais são as melhores cidades na qual poderão atuar sem que isso traga prejuízo para a empresa. Diversos dados podem servir de parâmetros para a escolha de uma região, como por exemplo o PIB, a demanda por viagens, o crescimento de um determinado setor industrial, o tamanho da população, etc.

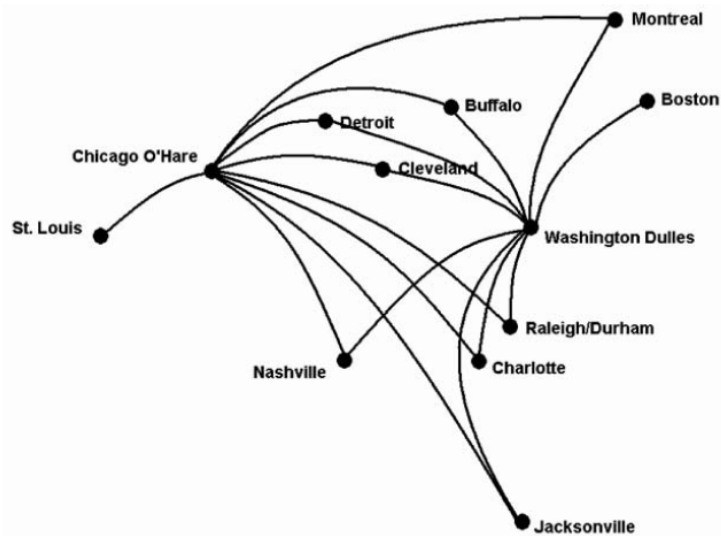


Figura 1 – Malha de uma companhia aérea com seus hubs e spokes.

Fonte: (BAZARGAN, 2010)

2.4 Aeronaves

As aeronaves são o que fazem uma companhia aérea atuar neste mercado, e é assim que ela faz dinheiro e divulga a sua imagem. Da mesma maneira que existem carros que possuem uma melhor *performance* de acordo com o terreno, o número de passageiros e a distância percorrida, o mesmo funciona para as aeronaves.

Desde sua criação e utilização nas duas grandes guerras mundiais, os aviões são classificados em função de seus objetivos, podendo haver ainda subclassificações, como por exemplo os aviões militares, os quais ainda podem ser classificados como bombardeiros, aviões de ataque leve, aviões caça, etc.

O mesmo acontece com os aviões de passageiros, podendo ser classificados como jatos executivos, jatos regionais e jatos para percorrerem maiores distâncias e comportar maior número de passageiros.

Os jatos regionais, por transportarem uma menor quantidade de passageiros, geralmente são de fuselagem estreita, aquela que possui corredor único no seu interior. Como exemplo, têm-se os jatos comerciais da Embraer, figura 2. Além disso, tais aeronaves, na maioria das vezes, são configuradas para possuírem apenas assentos na classe econômica, excluindo as classes executiva e primeira classe. Isso se deve pela razão desses voos serem consideravelmente curtos e de pouca duração.

Outra subcategoria de aviões refere-se àqueles movidos a motores a jato e os que são movidos a motores a hélice, que podem ser turbohélices ou com motores a pistão. A utilização de um ou outros varia muito com o trajeto a ser percorrido e em quais condições se deseja voar. Por exemplo, um avião com motores a jato é mais rápido e confortável, mas em compensação utiliza mais combustível em sua decolagem e pode ser inviável para viagens muito curtas.

Tabela 1 – Lista de aeronaves regionais produzidas ao longo da história.

Modelo	Assentos	Ano de introdução	Status
Sud Aviation Caravelle	80 - 140	1959	Descontinuado
Yakovlev Yak-40	32	1968	Descontinuado
Boeing 737	85 - 156	1968	Em produção
Fokker F28 Fellowship	55 - 70	1969	Descontinuado
VFW-Fokker 614	40 - 44	1975	Descontinuado
Bae 146/Avro RJ	70 - 112	1983	Descontinuado
ATR 42	48	1985	Em produção
Fokker 100	97 - 122	1988	Descontinuado
ATR 72	68 - 78	1989	Em produção
Bombardier CRJ 100/200	50	1992	Descontinuado
Fokker 70	72 - 85	1994	Descontinuado
Airbus A319	134 - 140	1996	Em produção
Embraer ERJ (Família)	37 - 50	1997	Descontinuado
Fairchild-Dornier 328JET	30 - 33	1999	Descontinuado
Bombardier CRJ700/900/1000	66 - 104	2001	Em produção
Embraer E-Jet (Família)	66 - 124	2004	Em produção
Antonov An-148	68 - 99	2009	Em produção
Sukhoi Superjet 100	87 - 108	2011	Em produção
Comac ARJ21	78 - 105	2016	Em produção
Airbus A220 (Família)	115 - 146	2016	Em produção
Embraer E-Jet E2 (Família)	80 - 146	2018	Em produção
Mitsubishi SpaceJet (Família)	69 - 92	2020	Em produção

Fonte: Adaptado de (WIKIPEDIA, 2019).

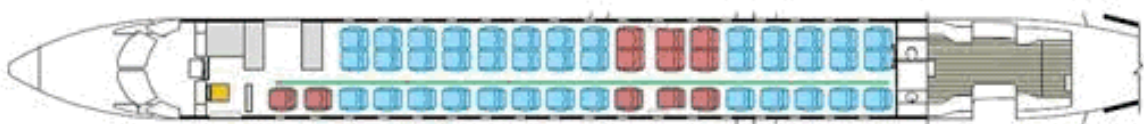


Figura 2 – Interior do Embraer ERJ 145, que possui fuselagem estreita.

Fonte: (LOPES, 2019).

Segundo Pai V. em seu estudo, o tamanho da aeronave e a frequência de voos estão atrelados ao tamanho da população atendida, sendo utilizadas maiores aviões para rotas em cidades mais populosas. Além disso, o tamanho de pista pode influenciar na escolha da aeronave, sabendo que para cada aeronave fabricada há um comprimento de pista mínimo para que a mesma possa ser operada em segurança (PAI, 2010).

O problema de selecionar qual aeronave utilizar para cumprir determinados trajetos propostos por uma companhia aérea é conhecido como FAP (*Fleet Assignment Problem*, em português Problema de Alocação de Frota) (ELTOUKHY; CHAN; CHUNG, 2017), e é bas-

tante estudado pelas mesmas, sabendo o quanto este mercado pode ser competitivo (SHERALI; BISH; ZHU, 2006; GU et al., 1994).

Como já mencionado, os principais fabricantes de aviões regionais no mundo são a Boeing Brasil-Commercial e a Airbus. Apesar destes dois fabricantes serem os principais do setor, não estão sozinhos, concorrendo principalmente com a fabricantes de turboélices ATR. A tabela 1 apresenta a lista de aeronaves regionais produzidas no mundo e seus respectivos status de produção. Apesar destas aeronaves serem consideradas regionais, assim como explicado por (BETTINI, 2010), este termo ainda é cercado de dúvidas, sendo que algumas aeronaves que não são consideradas regionais atuam neste mercado, como o Boeing 737, o Airbus A319 entre outros.

2.5 Pesquisa operacional

Muitas decisões são tomadas de maneira mais intuitiva e sem uma metodologia de suporte, mas esta forma de decisão não é precisa e traz grandes riscos associados. Apesar de frequentemente as pessoas tomarem decisões corretas a partir de meios empíricos, isto não elimina a possibilidade de erros, de escolhas erradas e de más decisões. Para que estes riscos sejam mitigados, é necessário um embasamento científico e uma busca por informações de confiança e qualidade, para que se tenha uma escolha sensata e com convicção.

Assim, foi utilizado pela primeira vez de maneira formal, na década de 40, uma metodologia para apoiar as tomadas de decisões, conhecida atualmente como *Pesquisa Operacional* (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

A indústria é um dos setores que mais se beneficia da pesquisa operacional. Para que seu lucro seja o maior possível, muitas vezes estas empresas precisam otimizar sua linha de produção, de forma que o gasto com produtos e matérias-primas seja o menor possível para se atingir um mesmo objetivo (ARENALES et al., 2015). Este tipo de problema é muito encontrado na pesquisa operacional.

A Delta Airlines foi a primeira companhia aérea a utilizar dos avanços da programação matemática e computacional para resolver problemas de otimização de alocação de frotas, resultando em ganhos na casa dos milhões de dólares nos anos seguintes (SUBRAMANIAN et al., 1994).

2.5.1 Programação linear

Um dos ramos mais utilizados na pesquisa operacional é a programação linear. O termo *programação* não se refere à programação em computação, e sim com o significado de *planejamento*, enquanto *linear* refere-se necessariamente à utilização de funções lineares (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Dentro da programação linear, há diversos campos de estudos e que podem ser bastante explorados e utilizados como ferramentas para resolver problemas de otimização, como por exemplo o *Método Simplex*, o *Problema do Transporte e da Designação* e os *Modelos de Otimização de Redes*.

2.5.2 Programação inteira

Diversos problemas da pesquisa operacional podem ser resolvidos levando em consideração que suas variáveis podem assumir quaisquer valores. Entretanto, há casos em que essas variáveis podem apenas possuir valores inteiros como resultados (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Com isso, é necessário a utilização da programação inteira.

Na pesquisa operacional, a solução ótima encontrada pode gerar uma resposta que não é inteira. Caso haja uma restrição para que essas variáveis possuam apenas valores inteiros, o modelo selecionará as variáveis inteiras que melhor atendem ao objetivo desejado. A solução ótima sem exigir que as variáveis sejam inteiras constitui um limite superior (inferior) do valor da solução ótima com restrições inteiras em um problema de maximização (minimização).

Para a alocação de aeronaves, a razão de adicionar esta restrição fica mais nítida, pois não seria realista, por exemplo, alocar 1/3 de uma aeronave para cumprir uma rota. Assim, é essencial para esse tipo de problema colocar uma restrição para que as variáveis sejam apenas números inteiros.

2.5.3 Aplicação da programação inteira na aviação civil

Abara J., apresenta no seu trabalho algo parecido, onde a sua variável é inteira e linear (ABARA, 1989). Também, Hane C. A. cria um modelo inteiro para resolver a FAP¹, mas com a característica de que a sua alocação é diária (HANE et al., 1995). No seu modelo inteiro e linear Daskin M. S e Panayotopoulos utilizam uma aproximação lagrangiana para obter a sua solução ótima (DASKIN; PANAYOTOPOULOS, 2008).

Diferentemente do que é proposto por alguns autores que possuem pesquisa na área de FAP, o modelo aqui proposto não tem o objetivo de fazer a alocação de frota e realizar um *schedule design*, onde o tempo em permanência do avião em solo e no ar são levados em consideração para obter-se a máxima lucratividade ou minimização dos custos.

Sherali H. D, Bish E. K. e Zhu X. além de realizar o *schedule design*, propõe um modelo no qual a alocação da tripulação e escalas de manutenção das aeronaves são fatores relevantes (SHERALI; BISH; ZHU, 2006). Já Caetano D. J. e Guada N. D. acrescentam nos seus modelos restrições operacionais de disponibilidades ou de *slots*, autorização que uma companhia aérea recebe para pousar ou decolar em um determinado aeroporto em um período de tempo (CAETANO; GUALDA, 2015a) e (CAETANO; GUALDA, 2015b).

¹ Fleet Assignment Problem.

Medau J. C e Gualda N. D. F. apresentam como característica da sua pesquisa a possibilidade de as frotas realizarem conexões de passageiros e tribulação para reduzir significativamente os custos operacionais da empresa (MEDAU; GUALDA, 2018). Bélanger N. e Rexing B. determinam que o horário de saída de cada voo seja otimizado no modelo para obter uma máxima lucratividade e otimização das aeronaves, utilizando restrições de tempo máximo e mínimo de alterações possíveis (BÉLANGER et al., 2006) e (REXING et al., 2000). E Lohatepanont M e Barnhart C. desenvolvem um modelo integrado na qual cria as rotas que a empresa aérea irá operar e define quais serão as aeronaves utilizadas de forma ótima (LOHATEPANONT; BARNHART, 2004).

2.6 Plano de negócios

Toda empresa bem estruturada necessita construir seu plano de negócios, não por burocracia mas simplesmente para possuir um documento bem organizado sobre como se dará o funcionamento da empresa, desde a sua criação até como será o seu marketing (SEBRAE, 2013). O plano de negócios apresenta se vale a pena entrar neste negócio e se o que a empresa fará é rentável ou não.

Para a criação de uma companhia aérea, isso não pode ser diferente, ainda mais sabendo o quão competitivo e incerto é este mercado (DOGANIS, 2006). Com a formação de uma companhia regional o futuro é ainda mais indefinido, pois nota-se no país cada vez mais rotas para locais já muito bem atendidos e poucos investimentos em voos regionais.

Assim, uma empresa aérea precisa definir muito bem alguns pontos para que não se surpreenda futuramente, os quais serão apresentados a seguir.

1. Primeiro é preciso definir o que é o seu negócio. Para uma companhia aérea, este passo já está muito bem elaborado, uma vez que este setor já é bem conhecido mundialmente e sua estrutura e funcionamento são conhecidos.
2. É fundamental apresentar em um plano de negócios sobre quais serão os produtos e serviços oferecidos. Para uma companhia aérea estes serão as suas viagens aéreas ofertadas aos clientes. Mas é preciso inovar. Apesar de atualmente o principal atrativo para voar em uma dada companhia ser o preço das passagens, esta não é a única variável. Outros fatores que também influenciam na escolha de qual companhia aérea voar estão nos seus serviços de atendimento, na inovação frente à concorrência (PEREIRA; CAETANO, 2017) e até mesmo na pontualidade, sendo a do Brasil em geral considerada uma das melhores do mundo (ABEAR, 2017).
3. É importante escolher um local para ser a sua sede, no caso das companhias aéreas o seu *hub*. Assim como apresentado na seção 2.2.10 o *hub* é o principal local onde a em-

presa atuará, por isso é muito importante decidir qual o local mais estratégico para se estabelecer levando em consideração os objetivos da companhia.

4. Também é preciso definir os seus clientes. Se uma companhia aérea decide atuar no mercado regional, ela não deverá criar rotas internacionais de longo curso, por exemplo, pois ela estaria fugindo do seu objetivo e clientes alvos. Com isso, ela precisará criar rotas que atendam ao público-alvo. Consequentemente, suas aeronaves deverão ser escolhidas após a definição dos seus clientes, já que, para uma determinada rota, necessita-se de uma determinada aeronave.
5. Um dos principais pontos é o financeiro. O século XXI não está sendo o melhor financeiramente para as companhias aéreas do mundo todo (DOGANIS, 2006). Com isso, é preciso definir muito bem em seu plano de negócios qual será o capital investido e principalmente quando se espera obter o dinheiro investido de volta e finalmente lucrar.

Um plano de negócios bem definido é essencial para uma empresa de sucesso. As companhias aéreas atualmente estão buscando cada vez mais inovações e diferentes modelos de negócios para atrair mais passageiros, já que esse setor é um dos mais competitivos do mundo e a sua lucratividade pode cair drasticamente a qualquer momento, devido às imprevisões mundiais.

3 Metodologia

3.1 Tipo de estudo e delineamento da pesquisa

Esta é uma pesquisa de modelagem baseada no *Design Science*, ou em português, *ciência do artificial*, *ciência do projeto* e até *ciência da engenharia* (DRESCH; LACERDA; JÚNIOR, 2015).

O trabalho tem como design a pesquisa aplicada, com as ideias aplicadas pela *Design Science Research*, na qual o principal objetivo é criar soluções para problemas, melhorar sistemas e desenvolver otimização (DRESCH; LACERDA; JÚNIOR, 2015).

A pesquisa utilizou um método de pesquisa de modelagem, onde tais modelos podem simplificar o entendimento da realidade. Este método é bastante utilizado na área de gestão e quando se pratica a pesquisa operacional (MORABITO et al., 2018).

Além disso, é uma pesquisa descritiva, que busca descrever fenômenos e características para retratar um assunto de estudo (GIL, 2008). A pesquisa possui um caráter exploratório, onde descreve situações reais e pouco exploradas. Quanto a forma de abordagem e de analisar as informações encontradas, esta pesquisa tem um viés quantitativo (GIL, 2008).

3.2 População e amostra

Como mencionado por Caetano D. J. e Gualda N. D. F., o planejamento operacional de uma companhia aérea pode ser dividido em três fases: a escolha de quais rotas serão atendidas, quais aeronaves serão utilizadas para viajarem até esses destinos e quais serão os tripulantes destes voos (CAETANO; GUALDA, 2015a). Neste trabalho serão exploradas as duas primeiras fases do planejamento.

Neste sentido, para determinar quais são as melhores aeronaves e malha aérea de uma nova companhia aérea regional com *hub* em Goiânia, foram delimitadas a população e a amostra de interesse, como apresentado a seguir.

3.2.1 Atuação da companhia

Primeiramente, a análise deu-se apenas no mercado doméstico e não internacionalmente. Ademais, o Aeroporto Internacional de Goiânia foi o local escolhido como *hub* da companhia. Assim, todos os voos têm como origem ou destino este aeroporto.

3.2.2 Malha aérea

Uma companhia aérea precisa delimitar a sua área de atuação, e aqui não foi diferente. As escolhas das rotas se deu por meio da análise de demanda entre as regiões analisadas e o *hub*. Com isso, quando um aeroporto tem demanda para o *hub*, ou o caminho contrário, esta rota foi escolhida e adicionada à malha. Entretanto, como critério adicional, este aeroporto tem que cumprir o requisito de tamanho de pista mínimo para que a aeronave consiga decolar ou pousar no local. Ademais, foi acrescentada uma restrição de alcance, podendo atuar em um destino apenas as aeronaves que possuem um alcance máximo maior do que a distância entre rotas.

Para facilitar a análise dos destinos escolhidos, foi utilizado o código dos aeródromos definidos pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), que é constituído por quatro letras e na qual cada aeródromo possui um código próprio. Por exemplo, o Aeroporto Internacional de Brasília possui o código ICAO de *SBBR*, e assim foi definido aqui. O código ICAO para todos os destinos finais está no apêndice A.

Para um local ser escolhido como um *spoke* para a companhia, deve possuir uma determinada quantidade de demanda. Analisando estes mesmos dados encontrou-se os seguintes prováveis destinos, apresentados pelos seus respectivos códigos ICAO na tabela 2. Com isso, ao todo foram encontrados 111 prováveis destinos analisando os dados de demanda da ANAC entre os anos de 2014 e 2018.

Tabela 2 – Destinos encontrados após análise dos dados de demanda.

Prováveis destinos									
SBAA	SBAE	SBAQ	SBAR	SBAT	SBAU	SBAX	SBBE	SBBH	SBBR
SBBV	SBBW	SBCA	SBCB	SBCF	SBCG	SBCH	SBCI	SBCJ	SBCM
SBCP	SBCR	SBCT	SBCX	SBCY	SBCZ	SBDB	SBDN	SBDO	SBEG
SBFE	SBFI	SBFL	SBFN	SBFZ	SBGL	SBGR	SBGV	SBHT	SBIH
SBIL	SBIP	SBIZ	SBJA	SBJE	SBJF	SBJI	SBJP	SBJU	SBJV
SBKG	SBKP	SBLE	SBLJ	SBLO	SBMA	SBMD	SBME	SBMG	SBMK
SBML	SBMO	SBMQ	SBMS	SBNF	SBNM	SBNT	SBPA	SBPB	SBPF
SBPG	SBPJ	SBPK	SBPL	SBPS	SBPV	SBQV	SBRB	SBRD	SBRF
SBRJ	SBRP	SBSG	SBSJ	SBSL	SBSM	SBSN	SBSO	SBSP	SBSR
SBSV	SBTB	SBTE	SBTF	SBTG	SBTT	SBTU	SBUA	SBUF	SBUG
SBUL	SBUR	SBVG	SBVH	SBVT	SBZM	SWFX	SWGN	SWPI	SWSI
SWVC									

3.2.3 Aeronaves

Assim como apresentado em 2.4, não é qualquer aeronave que cumpre uma rota com eficiência, por isso é necessário restringir o leque de escolhas de aeronaves. Neste trabalho os aviões considerados regionais foram aqueles que possuem entre 60 e 150 assentos e estão em

produção. A única exceção para o limite de assentos foi o Boeing 737 MAX 7 que possui 156 assentos, mas possui uma grande participação no mercado. Com isso, de acordo com a tabela 1 até 11 tipos de aeronaves poderiam ser escolhidas ao aplicar as restrições. Contudo, por motivo de escassez de dados necessários sobre essas aeronaves, apenas cinco foram selecionadas, sendo mais duas da mesma família. Além disso, para alguns casos onde há versões mais novas de uma mesma aeronave, a versão mais atual foi utilizada, como por exemplo o Embraer E190-E2 que é a versão mais atual do Embraer E190. Desta maneira a lista de aeronaves restringiu-se a apenas 7 opções: Embraer E190-E2, Embraer E195-E2, Airbus A220-100, Airbus A220-300, Airbus A319neo, Boeing 737 MAX 7 e ATR72-600. A tabela 3 apresenta todas as aeronaves que serão utilizadas nesta pesquisa e seus respectivos número de assentos.

Tabela 3 – População de aeronaves e seus respectivos número de assentos.

Aeronaves	Assentos
Embraer E190-E2	106
Embraer E195-E2	132
Airbus A220-100	115
Airbus A220-300	141
Airbus A319neo	140
Boeing 737 MAX 7	156
ATR72-600	68

3.3 Coleta de dados

Os dados coletados foram apenas secundários, ou seja, dados que foram previamente coletados em outras pesquisas ou trabalhos e que serão analisados aqui. Tais dados foram coletados de pesquisas da ANAC e da Embraer, por meio de visitas técnicas em órgãos públicos e empresas ligadas à área de aviação civil e regional.

3.4 Análise de dados

3.4.1 Criação da companhia aérea e plano de negócios

Os dados referentes à criação de uma companhia aérea regional e um plano de negócios foram analisados a partir das referências bibliográficas encontradas. Além disso, os dados coletados por meio das visitas técnicas realizadas na ANAC também foram verificados para construir as conclusões do trabalho.

3.4.2 Escolha do HUB

A escolha de Goiânia como *hub* deu-se a partir das visitas técnicas e da análise de dados.

Assim como apresentado na literatura e previamente explicitado na seção 2.2.10, a rede desta nova companhia aérea será formada pelo padrão *hub and spoke*, onde todos os voos são destino ou origem do *hub*, e não permitindo rotas entre *spokes*, (LEDERER; NAMBIMADOM, 1998; JAILLET; SONG; YU, 1996).

3.4.3 Definição da malha

Por meio da análise de demanda de um determinado aeroporto foi possível definir a sua viabilidade de servir como rota ou não. Tal análise se deu pela verificação dos dados obtidos pela ANAC, os quais fornecem informações de cidades e suas demandas aeroportuárias. Foi utilizado o método quantitativo de análise de dados, com a aplicação de modelagem em pesquisa operacional.

Dados os prováveis destinos apresentados em 3.2.2 e após analisá-los, foi necessário excluir do modelo os destinos que são inviáveis ou pouco lucrativos. Assim, nesta pesquisa, a rota que possuía uma demanda menor do que 50 passageiros semanais foi considerada não-lucrativa e foi retirada da análise. Este ponto de corte foi definido a partir de visitas técnicas com a companhia aérea Azul e com o fabricante de aviões Embraer. Além disso, os destinos que forem muito curtos entre si serão levados em consideração mesmo assim, já que possuem demanda, mesmo que tal trajeto seja mais compensador de ser realizado através de outros meios de transportes.

3.4.4 Seleção de aeronaves

A escolha das aeronaves foi obtida pela maximização do lucro de uma companhia aérea ao operar uma malha definida com combinações de frotas de aeronaves. Assim, utilizando diversos fatores pode-se definir as melhores aeronaves para uma determinada malha, por meio de um modelo de pesquisa operacional.

Para a determinação da receita, levou-se em consideração o preço médio das passagens aéreas divulgadas pela ANAC. Como apresentado em 2.2.7, o parâmetro RASK¹ é o quanto uma empresa aérea ganha a cada assento-quilômetro voado. Foi utilizado como parâmetro de custo o CASK² para indicar qual aeronave deve ser usada em cada rota.

Uma restrição foi a capacidade da aeronave em suprir a demanda existente, por meio da oferta de assentos na aeronave. Além disso, o avião selecionado precisa ter um alcance mínimo para que consiga cumprir a rota e, ao mesmo tempo, precisa de um requisito de comprimento de pista mínimo para pousos e decolagens menor do que a pista do aeroporto de destino, como mencionado em 3.2.2.

¹ Receita por assento-quilômetro voado.

² Custo por assento-quilômetro voado.

3.4.5 Preço da passagem

Como apresentado acima, o preço das passagens foram analisados a partir de dados provindos da ANAC. Para isso, após a coleta de dados sobre os preços das passagens médias para cada destino, foi realizada uma regressão não-linear de uma função potencial para encontrar a curva que define o valor médio do yield³ por quilômetro voado e, consequentemente, o preço das passagens para cada destino.

Como o preço pode variar de acordo com a companhia aérea, neste trabalho, considerou-se que a passagem aérea varia de acordo com o tamanho da aeronave. Nota-se na aviação civil comercial que quanto maior a aeronave, mais barata pode ser a passagem, pois é possível transportar mais passageiros com apenas uma viagem. Assim, para que o modelo fique mais realista em relação ao mercado, o preço da passagem foi considerado proporcional ao tamanho da aeronave, ou seja, o número de assentos.

Neste trabalho todos os valores de moedas serão utilizados em dólar americano (US\$), pois alguns dados foram obtidos nesta moeda. Além disso, as companhias aéreas trabalham muito com esta moeda pelo motivo de que cerca de 60% dos seus custos operacionais serem em dólar americano. Por exemplo, o barril do petróleo é comercializado mundialmente em dólar, e consequentemente esta moeda possui um forte peso nas tomadas de decisões.

3.5 Modelo matemático

Tendo em vista o que foi apresentado, pode-se, então, desenvolver um modelo que represente a solução desejada para a pesquisa. Para o modelo matemático, tem-se as seguintes função objetivo e restrições:

$$\text{Maximizar : } \sum_{j \in J} \sum_{a \in A} (T_{j,a} \times P_{j,a} - C_{j,a} \times S_a \times D_j \times F_{j,a}) \quad (3.1)$$

Onde j é um destino que está contido no conjunto de todos os destinos J e a é uma aeronave que está contida no conjunto de todas as aeronaves A .

Sujeito às restrições:

$$\sum_{a \in A} S_a \times F_{j,a} \geq Q_j, \quad \forall j \in J; \quad (3.2)$$

$$W_a \times BIN_{j,a} \leq L_j, \quad \forall j \in J \text{ e } a \in A; \quad (3.3)$$

$$R_a \geq D_j \times BIN_{j,a}, \quad \forall j \in J \text{ e } a \in A; \quad (3.4)$$

³ Receita por cada assento-quilômetro que foi pago.

$$F_{j,a} \leq 100 \times BIN_{j,a}, \quad \forall j \in J \text{ e } a \in A; \quad (3.5)$$

$$\sum_a BIN_{j,a} \leq K, \quad \forall j \in J \text{ e } a \in A; \quad (3.6)$$

$$F_{j,a} \leq 100 \times BIN2_a, \quad \forall j \in J \text{ e } a \in A; \quad (3.7)$$

$$\sum_a BIN2_a \leq K, \quad \forall j \in J; \quad (3.8)$$

$$\sum_{a \in A} P_{j,a} = Q_j, \quad \forall j \in J; \quad (3.9)$$

$$P_{j,a} \leq S_a \times F_{j,a}, \quad \forall j \in J \text{ e } a \in A; \quad (3.10)$$

$$F \text{ e } P \in Z; \quad (3.11)$$

onde

$T_{j,a}$	Preço da passagem para o destino j ;
$P_{j,a}$	Número de passageiros da aeronave a para o destino j
$C_{j,a}$	CASK da aeronave a para o destino j ;
S_a	Número total de assentos para a aeronave a ;
D_j	Distância total entre a origem e o destino j ;
$F_{j,a}$	Fluxo total de aeronaves a para o destino j ;
Q_j	Demanda de passageiros para o destino j ;
W_a	Tamanho mínimo de pista necessário para a aeronave a decolar ou pousar;
L_j	Tamanho da pista do aeroporto do destino j ;
R_a	Alcance máximo da aeronave a ;
K	Constante que representa o número máximo de diferentes tipos de aeronaves.

Além disso, BIN e $BIN2$ são variáveis binárias que possuem apenas os seguintes valores

$$\begin{matrix} BIN \\ BIN2 \end{matrix} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}. \quad (3.12)$$

O objetivo da nova empresa aérea é obter a máxima lucratividade alocando as melhores aeronaves para um dado destino. Na equação da função objetivo, equação 3.1, faz-se um soma-

tório duplo da subtração entre a receita da companhia (receita com a venda das passagens) e os gastos operacionais.

A restrição apresentada na equação 3.2 nos garante que todas as demandas serão atendidas, ou seja, todos os passageiros serão transportados pela companhia aérea.

A segunda restrição do modelo, equação 3.3, dita que o aeroporto de destino apenas pode receber aquelas aeronaves que necessitam um tamanho de pista menor ou igual ao tamanho de pista necessário para a aeronave a decolar ou pousar.

A equação 3.4 restringe que apenas podem cumprir um determinado destino aquelas aeronaves que possuem o alcance máximo maior do que a distância entre a origem e o destino. Com isso, as equações 3.5 e 3.6 trabalham para que as restrições de tamanho de pista e alcance máximo sejam cumpridas, fazendo com que aquelas aeronaves que não suportam tais restrições sejam excluídas de realizar esta rota. Com isso, o K na equação 3.6 é a quantidade máxima de tipos de aeronaves que deseja-se que opere.

As restrições apresentadas pelas equações 3.7 e 3.8 trabalham em conjunto. Para que não haja diversos tipos diferentes de aeronaves operando em uma mesma malha, adicionou-se uma restrição que impedisse que isso ocorresse, e com isso é possível restringir quantos diferentes tipos de aeronaves cumprirão estas rotas. Esta restrição é muito importante, pois dificilmente uma companhia aérea poderá trabalhar com todos os tipos de aeronaves. Com ela pode-se restringir, por exemplo, a alocação de apenas um único tipo de aeronave para cumprir todas as rotas.

A variável P serve para fazer a alocação de passageiros nas aeronaves. Assim, a restrição 3.9 garante que o número total de passageiros para o destino j seja igual a demanda. Além disso, a restrição 3.10 expressa que o número de passageiros alocados em uma respectiva aeronave seja menor ou igual ao número de assentos daquela aeronave vezes quantas vezes a mesma viajou, ou seja, esta restrição impede que sejam transportados mais passageiros do que o fluxo que aquela aeronave pode comportar.

A última restrição, equação 3.11 dita que as variáveis F e P do modelo sejam apenas inteiras. Com isso, impede-se que o modelo aloque, por exemplo, metade de uma aeronave ou de um passageiro para cumprir uma rota.

4 Resultados e discussões

4.1 Validação do modelo

Para que um trabalho tenha a confiabilidade nos resultados, é essencial que o mesmo tenha uma validação, onde mostra que os seus resultados estão certos e são confiáveis de serem reproduzidos por outros pesquisadores. Assim, realizou-se uma validação no LINGO e no Solver do Excel. O Solver é um *add-in* que pode ser adicionado ao Excel e tem como função a resolução de problemas de otimização para a programação linear. Tal validação precisa ser realizada com poucos valores pois estes modelos simplificados também são utilizados para encontrar possíveis erros ou resultados de forma mais rápida, que são extremamente difíceis de serem descobertos caso sejam muito grandes.

Então, neste modelo simplificado foram considerados apenas dois destinos, e que podem ser atendidos por apenas duas aeronaves. Esses destinos e aeronaves são apresentados na tabela 4. Assim, os dois destinos selecionados foram o Aeroporto Internacional de Brasília (SBBR) e o Aeroporto Internacional de Confins (SBCF). As aeronaves escolhidas foram o Embraer E190-E2 e o Airbus A220-100.

Tabela 4 – Destinos e aeronaves do modelo simplificado.

Destinos	Aeronaves
SBBR	E190-E2
SBCF	A220-100

As figuras 3 e 4 apresentam os resultados para o problema de alocação no LINGO e no Solver, sendo que o objetivo era alocar a aeronave no qual a função objetivo é maximizada. Com isso, foram encontrados, tanto no modelo do LINGO quanto no Solver o resultado ótimo de US\$ 341.687,5 e US\$ 341.687,6, respectivamente, apresentando uma diferença de praticamente 0%.

Além disso, pode-se notar em ambas as figuras que as variáveis para o fluxo de aeronaves foram as mesmas para os dois modelos (no Solver essas variáveis são **x4** e **x8**), apresentando um fluxo de 2,46087 e 8,104348 com a alocação do A220-100, tanto para Brasília quanto para Confins, respectivamente. Estes modelos não utilizaram variáveis inteiras, pois queria-se demonstrar que ambos estavam de acordo, e por isso não precisou-se adicionar tal restrição. Os dados sobre demandas, distâncias, passagens, CASK, alcances e assentos foram os mesmos do modelo final.

Pode-se notar que tal modelo é funcional e está de acordo com o planejado, obtendo-se os resultados exatos. Assim, pôde-se continuar a pesquisa, onde o próximo passo é acrescentar

as outras rotas e aeronaves desejadas.

```

Global optimal solution found.
Objective value:                341687.5
Infeasibilities:                0.000000
Total solver iterations:        5
Elapsed runtime seconds:        0.39

Model Class:                    LP

Total variables:                14
Nonlinear variables:            0
Integer variables:              0

Total constraints:              29
Nonlinear constraints:          0

Total nonzeros:                56
Nonlinear nonzeros:            0

```

Variable	Value	Reduced Cost
N_FROTA	2.000000	0.000000
DEMANDA(SBBR)	283.0000	0.000000
DEMANDA(SBCF)	932.0000	0.000000
PASSAGEM(SBBR, E190_E2)	178.2965	0.000000
PASSAGEM(SBBR, A220_100)	178.2965	0.000000
PASSAGEM(SBCF, E190_E2)	368.2526	0.000000
PASSAGEM(SBCF, A220_100)	368.2526	0.000000
DISTANCIA(SBBR)	163.0500	0.000000
DISTANCIA(SBCF)	647.4200	0.000000
TAM_PISTA(SBBR)	3200.000	0.000000
TAM_PISTA(SBCF)	3000.000	0.000000
FLUXO(SBBR, E190_E2)	0.000000	0.000000
FLUXO(SBBR, A220_100)	2.460870	0.000000
FLUXO(SBCF, E190_E2)	0.000000	0.000000
FLUXO(SBCF, A220_100)	8.104348	0.000000

Figura 3 – Validação do modelo simplificado no LINGO.

x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	Resposta	
178,2965	-2382,69	178,2965	-2496,76	368,2526	-5323,63	368,2526	-5655,92	\$	341.687,60
283	0	0	2,46087	932	0	0	8,104348		
0	106	0	115	0	0	0	0	283	>= 283
0	0	0	0	0	106	0	115	932	>= 932
								0	
1	0	1	0	0	0	0	0	283	= 283
0	0	0	0	1	0	1	0	932	= 932
								0	
1	0	0	0	0	0	0	0	283	<= 10000
0	0	1	0	0	0	0	0	0	<= 10000
0	0	0	0	1	0	0	0	932	<= 10000
0	0	0	0	0	0	1	0	0	<= 10000
								0	
0	1	0	0	0	0	0	0		>= 0
0	0	0	1	0	0	0	0	2,46087	>= 0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	>= 0
0	0	0	0	0	0	0	1	8,104348	>= 0

Figura 4 – Validação do modelo simplificado no Solver.

4.2 Rotas selecionadas e malha final

Como citado em 3.2.2 encontraram-se 111 prováveis destinos. Entretanto, ao transformar tais demandas em valores semanais obteve-se diversos destinos com menos que 50 passageiros, e como mencionado na mesma seção estes foram retirados da análise. Assim, ao todo, restaram 40 destinos rentáveis e lucrativos para a companhia aérea. Estes destinos são apresentados pela tabela 5. Com isto aplicado, apenas os destinos apresentados serão utilizados na modelagem final. Para uma melhor visualização, todas as rotas estão apresentadas na figura 5, onde é possível visualizar todos os 40 destinos da companhia aérea no Brasil.

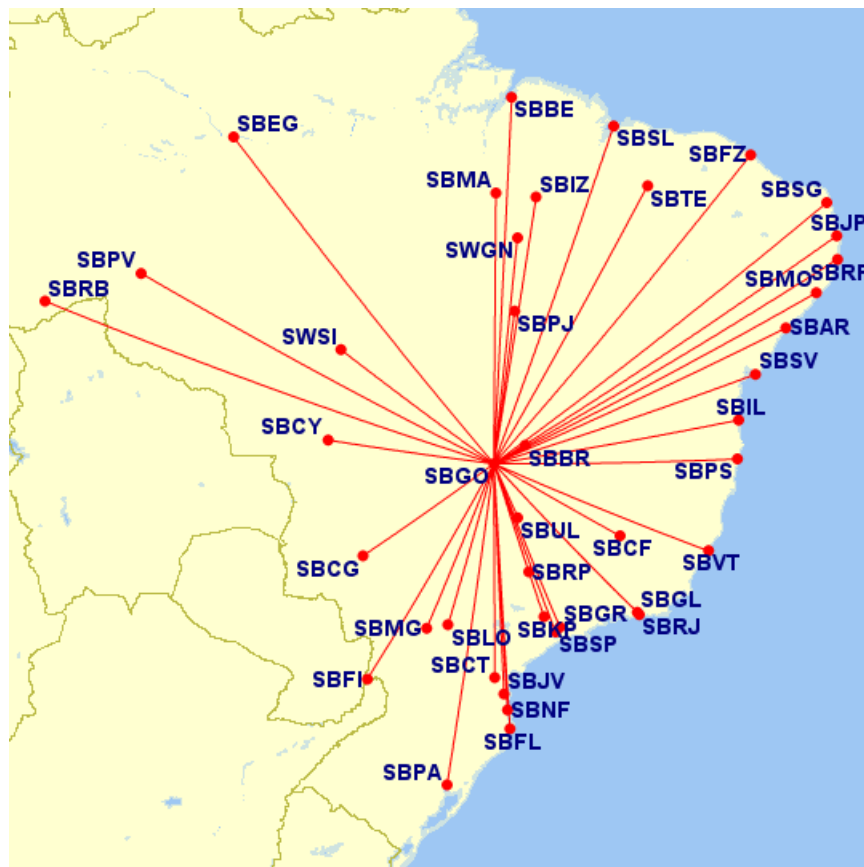


Figura 5 – Malha final com a origem e todos os destinos.

Analisando a figura 5 pode-se notar o quanto é positiva a escolha do hub em Goiânia. Tal cidade fica localizada no centro do país e, conseqüentemente, torna-se em média mais próxima dos seus destinos. Nota-se, também, que as rotas estão distribuídas ao longo de todo o país, e atendendo todas as regiões, mas principalmente as cidades litorâneas, onde há maior densidade demográfica.

Tabela 5 – Destinos finais selecionados após exclusões de demanda mínima.

Destinos selecionados							
SBAR	SBBE	SBBR	SBCF	SBCG	SBCT	SBCY	SBEG
SBFI	SBFL	SBFZ	SBGL	SBGR	SBIL	SBIZ	SBJP
SBJV	SBKP	SBLO	SBMA	SBMG	SBMO	SBNF	SBPA
SBPJ	SBPS	SBPV	SBRB	SBRF	SBRJ	SBRP	SBSG
SBSL	SBSP	SBSV	SBTE	SBUL	SBVT	SWG N	SWSI

4.3 Demanda

Aplicada a restrição de demanda encontrou-se, então, 40 destinos viáveis para a atuação da empresa aérea. A demanda encontrada, como citado anteriormente, será dada por números de passageiros semanais, e são apresentadas a seguir na tabela 6. Com isso, obteve-se uma demanda de 16.601 prováveis passageiros por semana.

As demandas existentes possuem valores que podem variar bastante, deste a necessidade de transportar 51 passageiros semanais do Aeroporto Internacional de Goiânia até o Aeroporto Municipal Presidente João Figueiredo, no Mato Grosso, até 2.813 passageiros semanais até o Aeroporto Internacional de Guarulhos, em São Paulo.

Tabela 6 – Demanda semanal para cada rota selecionada.

Demanda semanal							
SBAR	SBBE	SBBR	SBCF	SBCG	SBCT	SBCY	SBEG
79	225	283	932	175	570	606	165
SBFI	SBFL	SBFZ	SBGL	SBGR	SBIL	SBIZ	SBJP
79	286	364	724	2.813	61	53	110
SBJV	SBKP	SBLO	SBMA	SBMG	SBMO	SBNF	SBPA
59	737	76	94	52	190	179	691
SBPJ	SBPS	SBPV	SBRB	SBRF	SBRJ	SBRP	SBSG
589	164	98	68	405	1.219	338	205
SBSL	SBSP	SBSV	SBTE	SBUL	SBVT	SWG N	SWSI
136	2.597	482	106	82	322	136	51

Nota-se que as maiores demandas estão na região sudeste do país, como era esperado. Tais estados possuem os aeroportos mais movimentados do país e grandes centros econômicos, com os maiores fluxos de viagens para o Aeroporto Internacional de Guarulhos, o mais movimentado do país, seguido pelo Aeroporto Internacional de Congonhas, também em São Paulo, e em seguida pelo Aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro.

4.4 Preços das passagens

Os preços das passagens foram obtidos da base de dados da ANAC. Os dados obtidos apresentavam os valores das passagens para cada rota e a quantidade das mesmas vendidas. Inicialmente, foi preciso padronizar os valores para que fossem proporcionais às distâncias percorridas. Além disso, como apresentado em 3.4.5, os preços das passagens foram proporcionais ao número de assentos da aeronave, e com isso realizou-se uma regressão não-linear baseada em uma função potencial para as seguintes configurações de assentos:

- Até 120 assentos;
- Entre 121 e 150 assentos;
- 151 assentos ou mais.

Com isso, os dados foram separados em três classes de passagens, como mostra a tabela 7.

Tabela 7 – Classificação das aeronaves por número de assentos.

Assentos	Aeronaves
- 120	ATR72-600 E190-E2 A220-100
121 - 150	E195-E2 A319Neo A220-300
150 +	737 MAX 7

Realizada as regressões utilizando os respectivos dados de passagens para cada classe de assentos, obteve-se os gráficos de cada uma delas. A figura 6 apresenta a linha de tendência para a classe de até 120 assentos por aeronave. A figura 7 mostra a curva resultante para a classe entre 121 e 150 assentos. E por fim, a figura 8 apresenta a linha de tendência da receita por cada assento-quilômetro que foi pago (*yield*) para a classe com mais de 150 assentos.

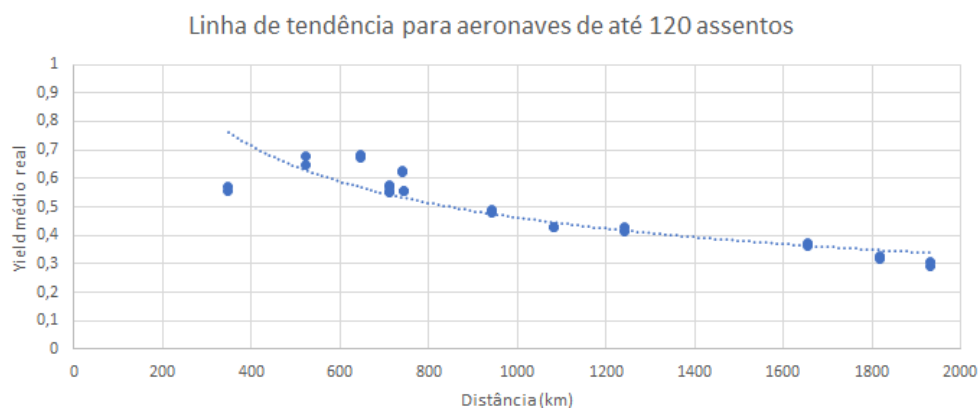


Figura 6 – *Yield* médio pela distância para a classe com até 120 assentos.

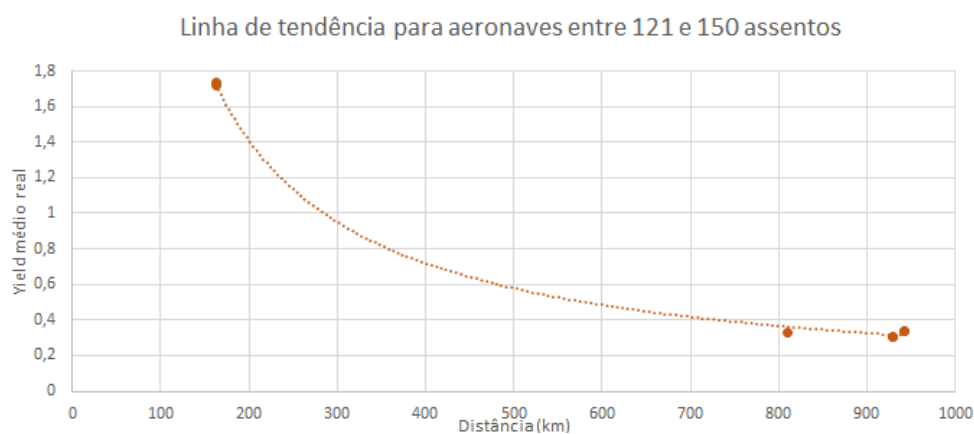


Figura 7 – *Yield* médio pela distância para a classe entre 121 e 150 assentos.

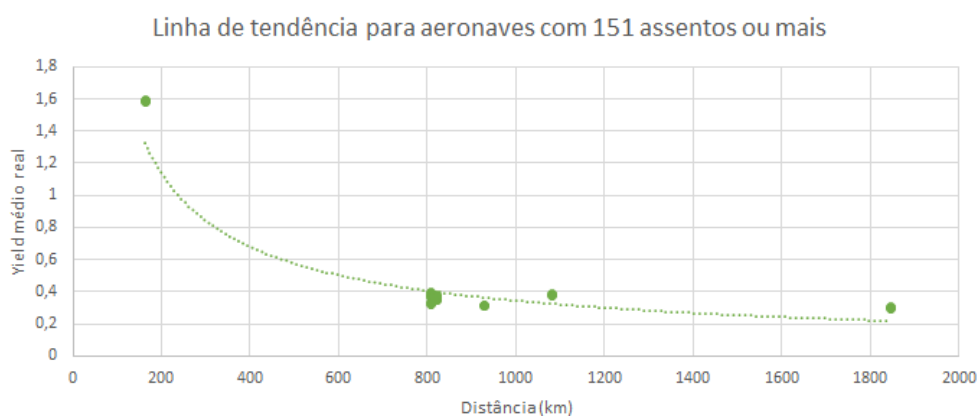


Figura 8 – *Yield* médio pela distância para a classe com mais de 150 assentos.

Já a figura 9 apresenta a sobreposição de todos os *yields* médios pela distância para todas as classes de assentos.

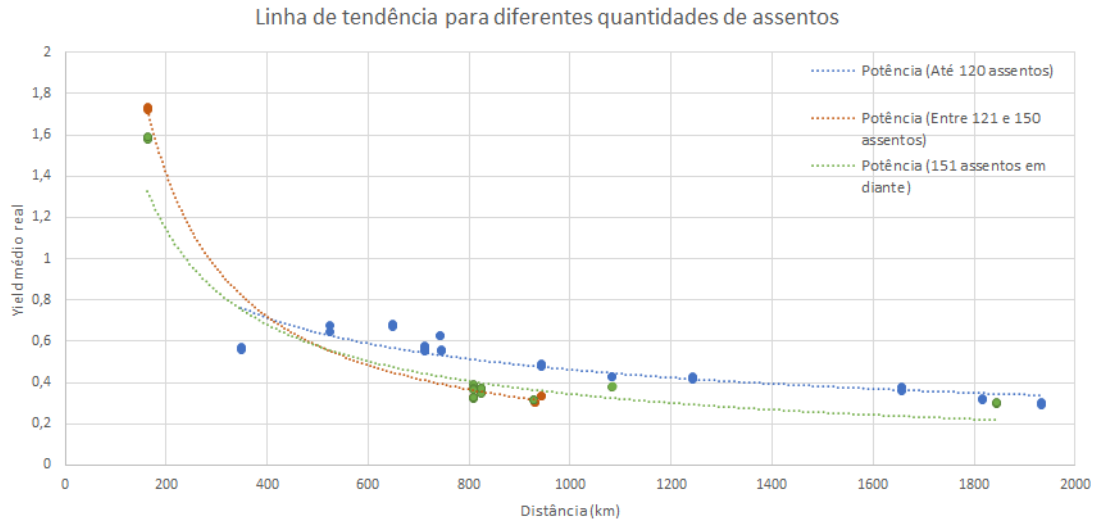


Figura 9 – *Yield* médio pela distância.

Cada uma das linhas de tendência possuem uma equação proporcional à distância que representa o preço da passagem final. Além disso, também foi definido o coeficiente de determinação, R^2 , para cada uma delas. Tal coeficiente, que possui valores entre 0 e 1, em porcentagem, determina o quanto a equação pode ser representada pela linha apresentada e o quanto o modelo consegue explicar a variância dos valores observados, onde quanto mais próximo a 1 (100%) melhor.

A equação que representa a linha de tendência para a classe de até 120 assentos, equação 4.1, é

$$yield = 12,231 \times x^{-0,474}, \quad (at\ 120\ assentos) \quad (4.1)$$

onde x representa a distância, e com um coeficiente de determinação no valor de $R^2 = 0,7927$.

Para a classe entre 121 e 150 assentos tem-se a equação 4.2 com $R^2 = 0,994$.

$$yield = 242,47 \times x^{-0,972}, \quad (entre\ 121\ e\ 150\ assentos) \quad (4.2)$$

E por fim, a linha de tendência para a classe com mais de 150 assentos pode ser representada pela equação 4.3, com $R^2 = 0,8768$.

$$yield = 57,921 \times x^{-0,742}, \quad (maior\ que\ 150\ assentos) \quad (4.3)$$

Assim como pode-se notar pelas figuras 6, 7 e 8, o *yield* decresce com a distância percorrida até o destino final para todas as classes de assentos, e isto é representado pelas suas respectivas equações. Este é o principal motivo de viagens internacionais com grandes distâncias terem uma receita por assento-quilômetro mais baixa se comparado a voos nacionais,

com distâncias menores, ou seja, quanto mais longe for o seu destino, menos será pago para voar cada quilômetro. Isto está atrelado, também, ao fato de que as aeronaves consomem uma grande parte do seu combustível ao decolarem e gastarem muito menos ao permanecerem em voo de cruzeiro¹. Com isso, voos com curtas distâncias possuem um CASK² maior em relação aos de longa distância.

4.5 Modelagem

Após as definições finais de CASK, preços das passagens e demanda pode-se realizar a simulação no software LINGO para encontrar as aeronaves que cumprem melhor cada rota. Contudo, realizou-se vários cenários de simulação para descobrir como a seleção de aeronaves se comporta. Com isso, foram realizados oito possíveis cenários de atuação da companhia aérea. São eles:

1. Apenas um tipo de aeronave para cumprir todas as rotas;
2. Até dois tipos de aeronaves para cumprir todas as rotas;
3. Até três tipos de aeronaves para cumprir todas as rotas;
4. Até quatro tipos de tipos de aeronaves para cumprir todas as rotas;
5. Cinco ou mais tipos de aeronaves para cumprir todas as rotas;
6. Apenas um tipo de aeronave para cumprir todas as rotas e sem restrições de tamanho de pista ou alcance.

4.5.1 Primeiro cenário

O primeiro cenário a ser testado foi o de selecionar apenas uma aeronave que cumpra todas as rotas com máxima eficiência. Tal resultado é apresentado na tabela 8.

Tabela 8 – Resultado da alocação de aeronaves para o primeiro cenário.

Primeiro cenário	
Resultado	INVIÁVEL
Lucro (US\$)	-

Como pode-se notar, a simulação não encontrou um resultado viável para a solução do problema. Isto se deve às restrições de alcance e tamanho de pista mínimo impostas ao modelo.

¹ Regime no qual a aeronave possui altitude constante durante o voo.

² Custo por assento-quilômetro voado.

Por exemplo, a aeronave ATR72-600 consegue decolar e pousar em todas as pistas propostas no modelo. Entretanto, esta não possui alcance suficiente para cumprir a rota até Fortaleza (SBFZ) que possui uma distância de $1845km$ de Goiânia, enquanto a mesma aeronave possui um alcance de apenas $1528km$.

A mesma inviabilidade ocorre com todas as outras aeronaves, sendo que a maioria possui alcance mínimo para cumprir todas as rotas, mas alguns aeroportos de destino não possuem um tamanho de pista que possibilite estas mesmas aeronaves pousarem ou decolarem.

Uma observação que deve ser feita é em relação ao Aeroporto Santos Dumont (SBRJ), no Rio de Janeiro. O mesmo possui um tamanho de pista de $1323m$, mas a aeronave que possui um menor tamanho de pista para decolar e pousar é o ATR72-600, que necessita de $1333m$, ou seja, $10m$ a mais. Com isso, o SBRJ não poderia receber nenhum tipo de aeronave.

Entretanto, o aeroporto de SBRJ possui uma operação especial em que pode receber determinados tipos de aeronaves que não necessitam de um tamanho de pista muito grande. Com isso, para que o Santos Dumont não fique de fora do modelo, seu tamanho de pista foi alterado para receber o ATR72-600, que possui o tamanho de pista necessário mais próximo.

Assim, selecionar apenas uma aeronave para cumprir todos os destinos é impossível dadas as restrições impostas ao modelo.

4.5.2 Segundo cenário

Este cenário é solucionado com a alocação de até dois tipos de aeronaves para executar todas as rotas. Com isso, obteve-se o resultado apresentado na tabela 9.

Tabela 9 – Resultado da alocação de aeronaves para o segundo cenário.

Segundo cenário		
Resultado	Aeronave	Número de rotas
	E190-E2	0
	E195-E2	0
	A220-100	32
	A220-300	0
	A319Neo	0
	B737-M7	0
	ATR-72	25
Lucro (US\$)		6.364.304,00

As duas aeronaves encontradas para operar todas as rotas da malha e obter a maior lucratividade para a companhia aérea foram o Airbus A220-100 e o ATR72-600, os quais cumpriram 32 e 25 rotas, respectivamente. O número de rotas na tabela 9 é maior do que os 40 destinos pois em alguns deles as duas aeronaves são alocadas.

O A220-200 é uma aeronave que possui um alcance de 5460km, e com isso consegue percorrer todas as rotas analisadas, mas possui um tamanho de pista maior do que alguns aeroportos consegue suportar. Enquanto isso, o ATR72-600 possui um alcance baixo, mas consegue decolar e pousar em todos os aeroportos estudados. Assim, estas duas aeronaves foram escolhidas como as melhores para serem alocadas.

O que pode-se entender do modelo simulado é que nas rotas onde as duas aeronaves atuam é mais lucrativo alocar os dois modelos do que um número maior do mesmo modelo. Um exemplo foi para o resultado encontrado da alocação entre Goiânia e o Aeroporto Internacional de Campo Grande (SBCG), no Mato Grosso do Sul, onde foram alocados um A220-100 e um ATR72-600 para atender uma demanda de 175 passageiros semanais.

Com isso, o A220-100 transportará 115 passageiros e os outros 60 restantes serão transportados pelo ATR72-600, pois esta é a configuração ótima para se obter o maior lucro. Caso dois A220-100 fossem alocados para cumprir esta rota sobriariam 55 assentos vazios, ao invés de 8 com a alocação do ATR72-600. Apesar de o CASK do ATR72-600 ser maior do que o do A220-100 para este destino, como o número de assentos vazios na segunda opção seria bem maior, não compensaria alocar apenas o Airbus duas vezes.

Observa-se que, no segundo cenário, o SBRJ alocou apenas o ATR72-600 para transportar seus passageiros, como esperado, realizando um total de 18 voos semanais.

4.5.3 Terceiro cenário

No terceiro cenário até três aeronaves poderiam ser escolhidas para cumprir com a demanda da malha, obtendo-se o resultado da tabela 10.

Tabela 10 – Resultado da alocação de aeronaves para o terceiro cenário.

Terceiro cenário		
Resultado	Aeronave	Número de rotas
	E190-E2	0
	E195-E2	2
	A220-100	31
	A220-300	0
	A319Neo	0
	B737-M7	0
	ATR-72	19
Lucro (US\$)		6.389.473,00

Como apresentado, as três aeronaves selecionadas para cumprir de forma ótima todas as rotas foram o Embraer E195-E2, o Airbus A220-100 e o ATR-72.

Analisando este resultado, nota-se a preferência de alocar o A220-100 na maioria dos destinos, estando esta aeronave presente em 31 dos 40 destinos totais. Nota-se também que em alguns desses destinos mais de um tipo de aeronave foi alocada, visando a máxima lucratividade da companhia.

Comparando o lucro gerado com esta alocação em relação ao segundo cenário (apenas dois tipos de aeronaves), percebe-se um aumento de US\$ 25.169,00. Este resultado já era esperado, pois com a possibilidade de selecionar um número maior de tipos de aeronaves o modelo torna-se mais livre para fazer uma alocação ótima e, consequentemente, tende a aumentar o seu lucro. Assim, tem-se um incremento de cerca de 0,40% nos lucros finais, em relação ao segundo cenário.

4.5.4 Quarto cenário

No quarto cenário até quatro tipos de aeronaves poderiam ser escolhidas no modelo. Encontrou-se então os resultados apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Resultado da alocação de aeronaves para o quarto cenário.

Quarto cenário		
Resultado	Aeronave	Número de rotas
	E190-E2	25
	E195-E2	0
	A220-100	13
	A220-300	2
	A319Neo	0
	B737-M7	0
	ATR-72	18
Lucro (US\$)		6.421.664,00

As melhores aeronaves encontradas para a solução do modelo foram o Embraer E190-E2, o Airbus A220-100 e A220-300 e o ATR72-600.

Neste caso, o E190-E2 foi a aeronave que mais atuará na malha, percorrendo um total de 25 das 40 rotas, em sequência o ATR72-600, com 18 destinos, o A220-100 com 13 destinos, e por fim o A220-300 cumprindo duas rotas.

Assim como ocorreu a variação entre os cenários dois e três, o mesmo ocorre entre o três e quatro, havendo um aumento nos lucros da empresa, pois há uma maior liberdade de alocação. Com isso, obteve-se um aumento de US\$ 32.191,00, ou seja, cerca de 0,51% em comparação à alocação de três tipos de aeronaves.

4.5.5 Quinto cenário

Para a alocação de cinco ou mais tipos de diferentes aeronaves, os resultados são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Resultado da alocação de aeronaves para o quinto cenário.

Quinto cenário		
Resultado	Aeronave	Número de rotas
	E190-E2	25
	E195-E2	1
	A220-100	13
	A220-300	1
	A319Neo	0
	B737-M7	0
	ATR-72	18
Lucro (US\$)		6.421.892,00

Com isso, o Embraer E190-E2 foi escolhido como aquele que terá uma maior participação na malha, cumprindo um total de 25 rotas de 40. Em seguida vieram o ATR72-600 com 18 alocações, o Airbus A220-100, 13 destinos, e o Embraer E195-E2 e Airbus A220-300 com apenas uma rota cada.

As aeronaves permaneceram as mesmas para as combinações de cinco, seis ou sete aeronaves, pelo motivo de que o número máximo de tipos de aeronaves que o modelo alocaria para obter-se a máxima lucratividade para a companhia aérea seria de apenas cinco. Assim, ao alocar um número maior de tipos diferentes de aeronaves o resultado não será melhor ou mais lucrativo.

Além disso, a variação no lucro, comparando ao quarto cenário, foi de apenas US\$ 228,00, ou 0,0035%, apresentando que selecionar cinco tipos de aeronaves ao invés de quatro é indiferente. Nota-se também pela tabela 12 que a única variação em comparação ao quarto cenário foi a mudança na alocação de um Airbus A220-300 por um Embraer E195-E2, resultando na mínima variação dos lucros apresentada acima.

4.5.6 Sexto cenário

Neste último cenário desejou-se realizar a alocação da melhor aeronave para realizar todas as demandas da malha, mas neste cenário não existe a restrição de tamanho de pista mínimo, ou seja, tal aeronave pode pousar em qualquer aeroporto, mesmo se ele não tiver um tamanho de pista maior do que a aeronave necessita. Também, foi retirada a restrição de alcance máximo, ou seja, toda aeronave pode alcançar qualquer destino neste cenário. O resultado encontrado pode ser analisado na tabela 13.

Tabela 13 – Resultado da alocação de aeronaves para o sexto cenário.

Sexto cenário		
Resultado	Aeronave	Número de rotas
	E190-E2	0
	E195-E2	0
	A220-100	40
	A220-300	0
	A319Neo	0
	B737-M7	0
	ATR-72	0
Lucro (US\$)		6.337.879,00

Como resultado ótimo encontrou-se como melhor aeronave o Airbus A220-100, obtendo-se um lucro semanal de US\$ 6.337.879,00.

4.6 Análise dos resultados

Realizados todos os cenários da simulação, pode-se fazer uma comparação entre os resultados.

Primeiramente, notou-se que dentre os sete diferentes tipos de aeronaves apenas o Boeing 737 MAX 7 e o Airbus A319neo não foram utilizados em nenhuma das alocações. Pressupõe-se que tal resultado se deve por estas aeronaves possuírem o maior número de assentos dentre as outras e, conseqüentemente, a chance de haver assentos vazios é muito maior.

Analisando os resultados obtidos para a máxima lucratividade possível no quinto cenário, seção 4.5.5, observa-se uma clara tendência na utilização de aeronaves com menores assentos. Tal resultado pode ser representado pela figura 10.

Este resultado está de acordo com a pesquisa de Swan, W. M., onde o autor mostra que nos últimos anos a média do número de assentos por avião vem diminuindo, apresentando uma reação do mercado à preferência de utilização de aeronaves menores e com menos assentos (SWAN, 2002).

Além disso, este resultado nos apresenta que as aeronaves que foram mais utilizadas neste cenário, ATR72-600, Embraer E190-E2 e Airbus A220-100, que são aviões que foram planejados para atender o mercado regional, estão cumprindo bem com o seu propósito, sendo os melhores para cumprir este tipo de rota.

A variação entre cenários pode ser realizada entre elas, mas as mais interessantes são as comparações entre o cenário dois, cinco e seis. Relembrando, no cenário dois apenas dois tipos de aeronaves poderiam ser utilizadas no modelo, enquanto no cenário cinco, poderia-se alocar

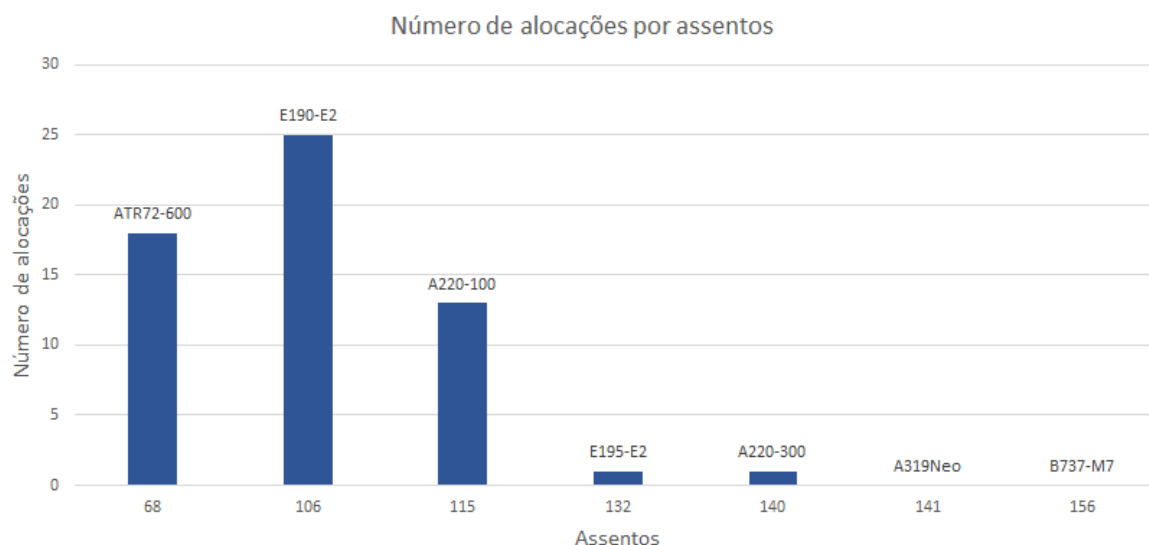


Figura 10 – Número de alocações por assentos para o cenário com lucro máximo.

até cinco ou mais tipos de aeronaves. No sexto cenário apenas uma aeronave poderia ser usada, mas excluindo as restrições de tamanho de pista e alcance máximo que impediam o modelo de alocar apenas um tipo de avião. A tabela 14 ordena o lucro obtidos em cada um desses cenários.

Tabela 14 – Lucro dos cenários dois, cinco e seis.

Cenários	Lucro US\$
Cenário dois	6.364.304,00
Cenário cinco	6.421.892,00
Cenário seis	6.337.879,00

A primeira comparação a ser realizada foi entre os cenários dois e cinco, um apresentando a solução ótima para o cenário com menos aeronaves, dadas todas as restrições impostas, e o outro podendo utilizar quantos tipos de aeronaves forem possíveis. Assim, teve-se a variação em dólar americano (US\$) e em porcentagem, apresentado na tabela 15, sendo a variação positiva, considerando o cenário cinco como mais lucrativo.

Tabela 15 – Variação entre os cenários dois e cinco.

Cenários	Variação (US\$)	Porcentagem (%)
Cenário dois Cenário cinco	57.588,00	0,91

Visto isso, percebe-se uma variação de apenas US\$ 57.588,00 nos lucros, onde ao invés de alocar dois tipos de aeronaves alocaria-se cinco, seis ou sete, com uma variação de menos

de 1%. Tal mudança de dois para cinco tipos de aeronaves parece improvável, visto que quanto mais tipos de aeronaves utilizar maior serão os custos operacionais da companhia, principalmente com treinamento de pilotos, comissários e diferentes técnicos de manutenção. Com isso, os custos para essa mudança superariam muitas vezes os ganhos.

Caso não houvesse as restrições de pista de alcance máximo das aeronaves, o Airbus A220-300 seria a melhor opção para realizar estas viagens, como visto em 4.5.6. Assim, a comparação entre alocar apenas uma aeronave (cenário seis) e duas aeronaves (cenário dois) é dado pela tabela 16, onde a variação foi de US\$ 26.425,00, 0,42%, sendo o cenário dois o mais lucrativo.

Tabela 16 – Variação entre os cenários dois e seis.

Cenários	Variação (US\$)	Porcentagem (%)
Cenário dois Cenário seis	26.425,00	0,42

Neste caso, como esperado, o cenário dois foi mais lucrativo, pois tem-se mais liberdade para alocar aeronaves. Contudo, neste caso a alocação de apenas uma aeronave pode ser mais lucrativa para a companhia. Como citado anteriormente, quanto mais aeronaves se utiliza, maior será o custo operacional para a empresa aérea. Assim, ao alocar dois tipos diferentes de aeronaves a empresa estará lucrando mais, mas em compensação os custos em obter um tipo a mais de avião será maior do que os ganhos.

Por último, tem-se os cenários mais lucrativos e menos lucrativo, tabela 17, e tem-se a maior variação nos lucros, cerca de US\$ 84.013,00, 1,33%. Lembrando que de acordo com a tabela 14 o cenário cinco é o mais lucrativo. Como a variação deste cenário é maior, é necessário realizar uma avaliação mais profundo para identificar qual seria o melhor cenário na prática, pois a variação de dois tipos de aeronaves para cinco é muito grande, provavelmente acarretando em custos de manutenção, treinamentos etc. bem maiores que os ganhos.

Tabela 17 – Variação entre os cenários cinco e seis.

Cenários	Variação (US\$)	Porcentagem (%)
Cenário cinco Cenário seis	84.013,00	1,33

Com tudo isso apresentado, percebe-se a grande utilização das aeronaves E190-E2, A220-100 e ATR72-600, sendo os mais utilizados no modelo.

Assim, utilizando o cenário mais lucrativo de todos, o cenário cinco, obtém-se a tabela final 18 com os resultados ótimos da pesquisa e seus lucros semanais, mensais e anuais e as aeronaves utilizadas.

Tabela 18 – Resultado final para o melhor dos cenários.

Melhor cenário		
Resultado	Aeronave	Número de rotas
	E190-E2	25
	E195-E2	1
	A220-100	13
	A220-300	1
	A319Neo	0
	B737-M7	0
	ATR-72	18
Lucro semanal (US\$)		6.421.892,00
Lucro mensal (US\$)		25.687.568,00
Lucro anual (US\$)		308.250.816,00

Conclusão

O mercado da aviação civil é extremamente competitivo, e as vezes imprevisível, onde qualquer tomada de decisão é muito importante. Desta forma, definir quais são as melhores rotas e aeronaves para cumpri-las, assim como o seu *hub*, pode ser a decisão que definirá se o futuro desta empresa aérea será promissor ou não.

Para isso, esta pesquisa teve como objetivo geral modelar o processo de escolha de uma malha aérea regional e de aeronaves para atendê-la, a partir de um *hub* em Goiânia, de forma a maximizar a lucratividade da companhia aérea. Tal objetivo foi atingido visto que a malha aérea foi definida e as melhores aeronaves para cumprir cada rota foram selecionadas por meio da modelagem computacional de pesquisa operacional com o auxílio do *software* LINGO.

Visando atingir o objetivo geral, o primeiro objetivo específico foi compreender os principais conceitos utilizados na aviação civil e aplicá-los de forma a encontrar os resultados necessários. Assim, os mesmos foram apresentados no referencial teórico após uma busca minuciosa na literatura.

O segundo objetivo específico foi compreender o processo de definição da escolha de uma malha aérea e expor a sua importância na hora do planejamento. Com isso, o mesmo foi atingido ao criar o procedimento para a escolha da malha aérea e explicar o porquê desta deliberação, visando a melhor escolha na tomada de decisão.

O próximo objetivo específico buscava definir quais eram os tipos de aeronaves mais adequados para atuarem no mercado regional da aviação. Tal objetivo foi atingido ao pesquisar na literatura o que define uma aeronave como regional e buscar quais são as principais e mais atuantes atualmente no mercado.

O quarto objetivo específico foi apresentar um guia de plano de negócios para a companhia aérea. Assim, o mesmo foi apresentado no referencial teórico, após uma busca na literatura, e mostrado como uma empresa aérea deve realizar o seu planejamento antes de atuar no mercado.

O objetivo específico seguinte foi definir a malha aérea desta companhia indicando os melhores destinos. Com isso, o mesmo foi atingido ao identificar os destinos com as maiores demandas, nos quais houvesse pelo menos uma aeronave que pudesse cumprir esta rota, e ao adiciona-los à malha aérea.

O sexto objetivo específico visava determinar os preços das passagens aéreas para cada destino analisado, a partir da obtenção e análise de dados secundários. Assim, realizou-se uma regressão não-linear utilizando dados de preço de passagens aéreas obtidos pela ANAC. Além disso, o preço foi influenciado pela capacidade de assentos da aeronave.

O último objetivo específico buscava determinar as combinações de frota de aeronaves ótimas para a malha aérea definida. Assim, para cada cenário escolhido obteve-se uma seleção de aeronaves ótimas para cumprir as rotas, objetivando a máxima lucratividade da companhia aérea.

A hipótese da pesquisa na qual apresentava a pesquisa operacional como uma boa estratégia para solucionar o problema de otimização e seleção das melhores malha aérea e aeronaves para uma empresa aérea regional foi confirmada ao obter-se os resultados das simulações. Assim, confirmou-se a utilidade desta área do conhecimento na busca por soluções ótimas no mercado da aviação civil regional.

A problemática da pesquisa buscava compreender como se daria a escolha da melhor malha e melhores aeronaves para a empresa. Assim, a mesma foi solucionada ao aplicar as metodologias empregadas e auxílio da literatura. Por fim, as melhores aeronaves e a malha aérea foram definidas e, em seguida, encontrados os melhores resultados que respondem à problemática do trabalho.

A metodologia utilizada teve um design de pesquisa aplicada, com um método de pesquisa de modelagem quantitativa. Os dados aqui utilizados foram secundários e obtidos a partir de reuniões e entrevistas com representantes da Embraer e ANAC. Tais dados eram referentes às características das aeronaves aplicadas, dados de demandas e preços das passagens aéreas. Com isso, pôde-se restringir a população e amostras da pesquisa. Além disso, foi apresentado o modelo matemático do trabalho e suas respectivas restrições.

No entanto, identifica-se nesta pesquisa algumas limitações. A principal foi em relação aos dados obtidos. Alguns preços de passagens não continham o tipo de aeronave operada, e consequentemente o número de dados que poderiam ser utilizados foi menor do que o obtido para realizar a regressão não-linear e definir a curva do *yield*. Uma outra limitação foi o tempo da pesquisa. Sabe-se que um trabalho de conclusão de curso é restrito e deve ser mais limitado. Com isso, algumas restrições que poderiam ser adicionadas ao modelo, apenas para torná-lo mais realista, não puderam ser adicionadas.

Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se adicionar mais restrições ao modelo para deixá-lo mais próximo da realidade das companhias aéreas, como por exemplo, um capital inicial e quanto pode-se gastar com compras de aeronaves, acrescentar janela de tempo e saber quantos voos uma mesma aeronave poderá cumprir em um dia, e consequentemente quantas aeronaves serão necessárias na sua empresa. Além disso, seria interessante um contato maior com companhias aéreas durante a pesquisa, para entender mais profundamente o funcionamento deste mercado e como se dão as decisões na prática, com mais reuniões, entrevistas e possivelmente um estágio acadêmico.

Referências

- ABARA, J. Applying Integer Linear Programming to the Fleet Assignment Problem. *Interfaces*, v. 19, n. 4, p. 20–28, aug 1989. ISSN 0092-2102. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/inte.19.4.20http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/inte.19.4.20>>. Citado na página 38.
- ABEAR. *Panorama 2017 - O setor aéreo em dados e análises*. [S.l.], 2017. 93 p. Citado na página 39.
- ANAC. *Painel de Indicadores do Transporte Aéreo 2017*. 2018. 1 p. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/painel-de-indicadores-do-transporte-aereo>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 31.
- ANAC, I. *Institucional ANAC*. 2018. 1 p. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/A_Anac/institucional>. Citado na página 32.
- ARENALES, M. et al. *Pesquisa operacional: para cursos de engenharia*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2015. Citado na página 37.
- BAZARGAN, M. *Airline operations and scheduling*. [S.l.]: Ashgate, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- BÉLANGER, N. et al. Periodic airline fleet assignment with time windows, spacing constraints, and time dependent revenues. *European Journal of Operational Research*, v. 175, n. 3, p. 1754–1766, dec 2006. ISSN 03772217. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221705004741https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221705004741>>. Citado na página 39.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. *Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2013. v. 1. Citado na página 37.
- BETTINI, H. Um retrato da aviação regional no brasil. *Journal of Transport Literature*, v. 1, n. 1, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 27, 31 e 37.
- BRUECKNER, J. K.; ZHANG, Y. A Model of Scheduling in Airline Networks: How a Hub-and-Spoke System Affects Flight Frequency, Fares and Welfare. *Journal of Transport Economics and Policy*, Journal of Transport Economics and Policy, v. 35, n. 2, p. 195–222, 2001. Citado na página 34.
- CAETANO, D. J.; GUALDA, N. D. F. Solving the Integrated Schedule Generation and Fleet Assignment Problem: an ACOBased Metaheuristic Approach. *Journal of Transport Literature*, SciELO Brasil, v. 9, n. 3, p. 30–34, sep 2015. ISSN 2238-1031. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2238-10312015000300030&lng=e>. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 41.
- CAETANO, D. J.; GUALDA, N. D. F. Um modelo integrado para a programação de voos e alocação de frotas. *Transportes*, v. 19, n. 2, p. 16, 2015. Citado na página 38.
- COOK, G. N.; BILLIG, B. *Airline Operations and Management: A Management Textbook*. [S.l.]: Routledge, 2017. Citado na página 27.

- DASKIN, M. S.; PANAYOTOPOULOS, N. D. A Lagrangian Relaxation Approach to Assigning Aircraft to Routes in Hub and Spoke Networks. *Transportation Science*, v. 23, n. 2, p. 91–99, may 2008. ISSN 0041-1655. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/trsc.23.2.91http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.23.2.91>>. Citado na página 38.
- DOGANIS, R. *The Airline Business*. [S.l.]: Routledge, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; JÚNIOR, J. A. V. A. *Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. [S.l.]: Bookman Editora, 2015. Citado na página 41.
- ELTOUKHY, A. E.; CHAN, F. T.; CHUNG, S. H. Airline schedule planning: A review and future directions. *Industrial Management and Data Systems*, [Eltoukhy, Abdelrahman E. E. Chan, Felix T. S. Chung, S. H.] Hong Kong Polytech Univ, Dept Ind & Syst Engn, Hong Kong, Hong Kong, Peoples R China. Chan, FTS (reprint author), Hong Kong Polytech Univ, Dept Ind & Syst Engn, Hong Kong, Hong Kong, Peoples R C, v. 117, n. 6, p. 1201–1243, 2017. ISSN 02635577. Citado na página 36.
- GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. [S.l.]: 6. ed. Editora Atlas SA, 2008. Citado na página 41.
- GU, Z. et al. Some properties of the fleet assignment problem. *Operations Research Letters*, v. 15, n. 2, p. 59–71, mar 1994. ISSN 01676377. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167637794900019http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0167637794900019>>. Citado na página 37.
- HANE, C. A. et al. The fleet assignment problem: Solving a large-scale integer program. *Mathematical Programming*, Springer, v. 70, n. 1-3, p. 211–232, 1995. Citado na página 38.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introdução à pesquisa operacional*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- JAILLET, P.; SONG, G.; YU, G. Airline network design and hub location problems. *Location Science*, v. 4, n. 3, p. 195–212, oct 1996. ISSN 09668349. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966834996000162http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0966834996000162>>. Citado na página 44.
- LEDERER, P. J.; NAMBIMADOM, R. S. Airline Network Design. *Operations Research*, v. 46, n. 6, p. 785–804, dec 1998. ISSN 0030-364X. Disponível em: <<https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.46.6.785http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.46.6.785>>. Citado na página 44.
- LOHATEPANONT, M.; BARNHART, C. Airline Schedule Planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment. *Transportation Science*, v. 38, n. 1, p. 19–32, feb 2004. ISSN 0041-1655. Disponível em: <<https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.1030.0026http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.1030.0026>>. Citado na página 39.
- LOPES, L. F. *Imagem do Embraer ERJ 145*. 2019. Citado na página 36.
- MEDAU, J. C.; GUALDA, N. D. F. Alocação de aeronaves a voos considerando restrições operacionais, de manutenção e de desempenho das aeronaves. *Transportes*, v. 26, n. 2, p. 101–117, 2018. Citado na página 39.

MORABITO, R. et al. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2018. Citado na página 41.

PAI, V. On the factors that affect airline flight frequency and aircraft size. *Journal of Air Transport Management*, v. 16, n. 4, p. 169–177, jul 2010. ISSN 09696997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699709000775><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0969699709000775>>. Citado na página 36.

PEREIRA, B. A.; CAETANO, M. Business model innovation in airlines. *International Journal of Innovation*, v. 5, n. 2, p. 184–198, 2017. Citado na página 39.

REXING, B. et al. Airline Fleet Assignment with Time Windows. *Transportation Science*, v. 34, n. 1, p. 1–20, feb 2000. ISSN 0041-1655. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/trsc.34.1.1.12277><http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.34.1.1.12277>>. Citado na página 39.

SEBRAE. *Como elaborar um plano de negócios*. Brasília, 2013. 164 p. Citado na página 39.

SHERALI, H. D.; BISH, E. K.; ZHU, X. Airline fleet assignment concepts, models, and algorithms. *European Journal of Operational Research*, v. 172, n. 1, p. 1–30, jul 2006. ISSN 03772217. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221705002109><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221705002109>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

SUBRAMANIAN, R. et al. Coldstart: Fleet Assignment at Delta Air Lines. *Interfaces*, v. 24, n. 1, p. 104–120, feb 1994. ISSN 0092-2102. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/inte.24.1.104><http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/inte.24.1.104>>. Citado na página 37.

SWAN, W. M. Airline route developments: a review of history. *Journal of Air Transport Management*, Elsevier, v. 8, n. 5, p. 349–353, 2002. Citado na página 61.

SWAN, W. M.; ADLER, N. Aircraft trip cost parameters: A function of stage length and seat capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 42, n. 2, p. 105–115, 2006. Citado na página 32.

TSAI, W.-H.; KUO, L. Operating costs and capacity in the airline industry. *Journal of air transport management*, Elsevier, v. 10, n. 4, p. 269–275, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

TSAI, W.-H. H.; KUO, L. Operating costs and capacity in the airline industry. *Journal of Air Transport Management*, v. 10, n. 4, p. 269–275, jul 2004. ISSN 09696997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699704000158><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0969699704000158>>. Citado na página 32.

WIKIPEDIA. *Regional jet*. 2019. 1 p. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Regional_jet>. Citado na página 36.

Apêndices

APÊNDICE A – Códigos ICAO

ICAO	Aeroporto	Município	UF
SBAR	Aeroporto Internacional de Aracaju	Aracaju	SE
SBBE	Aeroporto Internacional de Belém	Belém	PA
SBBR	Aeroporto Internacional de Brasília	Brasília	DF
SBCF	Aeroporto Internacional de Belo Horizonte	Belo Horizonte	MG
SBCG	Aeroporto Internacional de Campo Grande	Campo Grande	MS
SBCT	Aeroporto Internacional de Curitiba	Curitiba	PR
SBCY	Aeroporto Internacional de Cuiabá	Cuiabá	MT
SBEG	Aeroporto Internacional de Manaus	Manaus	AM
SBFI	Aeroporto Internacional de Foz do Iguaçu	Foz do Iguaçu	PR
SBFL	Aeroporto Internacional de Florianópolis	Florianópolis	SC
SBFZ	Aeroporto Internacional de Fortaleza	Fortaleza	CE
SBGL	Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	RJ
SBGR	Aeroporto Internacional de São Paulo	São Paulo	SP
SBIL	Aeroporto de Ilhéus	Ilhéus	BA
SBIZ	Aeroporto de Imperatriz	Imperatriz	MA
SBJP	Aeroporto Internacional de João Pessoa	João Pessoa	PB
SBJV	Aeroporto de Joinville	Joinville	SC
SBKP	Aeroporto Internacional de Campinas	Campinas	SP
SBLO	Aeroporto de Londrinas	Londrinas	PR
SBMA	Aeroporto de Marabá	Marabá	PA
SBMG	Aeroporto Regional de Maringá	Maringá	PR
SBMO	Aeroporto Internacional de Maceió	Maceió	AL
SBNF	Aeroporto Internacional de Navegantes	Navegantes	SC
SBPA	Aeroporto Internacional de Porto Alegre	Porto Alegre	RS
SBPJ	Aeroporto de Palmas	Palmas	TO
SBPS	Aeroporto de Porto Seguro	Porto Seguro	BA
SBPV	Aeroporto Internacional de Porto Velho	Porto Velho	RO
SBRB	Aeroporto Internacional de Rio Branco	Rio Branco	AC
SBRF	Aeroporto Internacional de Recife	Recife	PE
SBRJ	Aeroporto do Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	RJ
SBRP	Aeroporto de Ribeirão Preto	Ribeirão Preto	SP
SBSG	Aeroporto Internacional de Natal	Natal	RN
SBSL	Aeroporto Internacional de São Luís	São Luís	MA
S BSP	Aeroporto de São Paulo	São Paulo	SP
SBSV	Aeroporto Internacional de Salvador	Salvador	BA
SBTE	Aeroporto de Teresina	Teresina	PI
SBUL	Aeroporto de Uberlândia	Uberlândia	MG
SBVT	Aeroporto de Vitória	Vitória	ES
SWG N	Aeroporto de Regional de Araguaína	Araguaína	TO
SWSI	Aeroporto Municipal Presidente João Figueiredo	Sinop	MT

APÊNDICE B – Código LINGO

```

SETS:
ORIGEM/GO/;;
DESTINO/SBAR SBBE SBBR SBCF SBCG SBCT SBCY SBEG
        SBFI SBFL SBFZ SBGL SBGR SBIL SBIZ SBJP
        SBJV SBKP SBLO SBMA SBMG SBMO SBNF SBPA
        SBPJ SBPS SBPV SBRB SBRF SBRJ SBRP SBSG
        SBSL SBSP SBSV SBTE SBUL SBVT SWGN SWSI/;; !(j)
        CÓDIGO ICAO DE TODOS OS DESTINOS;

FROTA/E190_E2 E195_E2 A220_100 A220_300 A319Neo B737_M7 ATR_72/;; !(a);

SUB1(DESTINO):DEMANDA; !(j);
SUB2(DESTINO,FROTA):PASSAGEM; !(j,a);
SUB3(DESTINO):DISTANCIA; !(j);
SUB4(DESTINO):TAM_PISTA; !(j);
SUB5(DESTINO,FROTA):FLUXO; !(j,a);
SUB6(FROTA):PISTA_MIN; !(a);
SUB7(FROTA):ASSENTOS; !(a);
SUB8(DESTINO,FROTA):CASK; !(j,a);
SUB9(FROTA):ALCANCE; !(a);
SUB11(DESTINO,FROTA):BIN; !(j,a);
SUB12(FROTA):BIN2; !(a);
SUB13(DESTINO,FROTA):PASSAGEIROS; !(j,a);

ENDSETS

!-----;
DATA:

DISTANCIA = @OLE(); !DISTANCIA ENTRE A ORIGEM E O DESTINO;
DEMANDA = @OLE(); !DEMANDA DE CADA AEROPORTO;
PASSAGEM = @OLE(); !PREÇO DA PASSAGEM EM US$;
ASSENTOS = @OLE(); !NÚMERO DE ASSENTOS EM CADA TIPO DE AERONAVE;
TAM_PISTA = @OLE(); !TAMANHO DA PISTA DE CADA AEROPORTO;
PISTA_MIN = @OLE(); !TAMANHO DE PISTA MÍNIMO PARA CADA AERONAVE;
CASK = @OLE(); !CUSTO POR ASSENTO QUILOMETRO PARA CADA DESTINO E AERONAVE;
ALCANCE = @OLE(); !ALCANCE MÁXIMO DE CADA AERONAVE;
N_FROTA = 1; !1 A 7;

ENDDATA

!-----;

!FUNÇÃO OBJETIVO;
MAX = @SUM(SUB8(j,a):PASSAGEM(j,a)*PASSAGEIROS(j,a)
        - CASK(j,a)*ASSENTOS(a)*DISTANCIA(j)*FLUXO(j,a));
!-----;

!RESTRIÇÕES;

!DEMANDA;
@FOR(SUB1(j):
        @SUM(SUB7(a):FLUXO(j,a)*ASSENTOS(a)) >= DEMANDA(j));
!-----;
!PISTA;
@FOR(SUB5(j,a):
        PISTA_MIN(a)*BIN(j,a) <= TAM_PISTA(j));
!-----;
!ALCANCE;
@FOR(SUB5(j,a):
        ALCANCE(a) >= DISTANCIA(j)*BIN(j,a));
!-----;
!BINÁRIO QUE RESTRINGE PISTA E ALCANCE;
@FOR(SUB8(j,a):FLUXO(j,a) <= 100*BIN(j,a));

@FOR(SUB1(j):@SUM(SUB7(a):BIN(j,a)) <= N_FROTA);
!-----;
!RESTRIÇÃO NÚMERO DE PASSAGEIROS POR AERONAVE;

```

```

@FOR(SUB1(j):@SUM(SUB7(a):PASSAGEIROS(j,a)) = DEMANDA(j));

@FOR(SUB5(j,a):PASSAGEIROS(j,a) <= ASSENTOS(a)*FLUXO(j,a));
!-----;
!RESTRIÇÃO NÚMERO DE AERONAVES;
@FOR(SUB8(j,a):FLUXO(j,a) <= 100*BIN2(a));

@FOR(SUB1(j):@SUM(SUB7(a):BIN2(a)) <= N_FROTA);
!-----;
!RESTRIÇÃO VARIÁVEIS INTEIRAS E BINÁRIAS;
@FOR(SUB5(j,a):@GIN(FLUXO(j,a)));
@FOR(SUB5(j,a):@GIN(PASSAGEIROS(j,a)));
@FOR(SUB5(j,a):@BIN(BIN(j,a)));
@FOR(SUB5(j,a):@BIN(BIN2(a)));

```